



EFFECTO BACTERICIDA DE NANOPARTICULAS DE HIERRO, COBRE, ZINC Y PLATA EN EL TRATAMIENTO Y DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Paola Lizeth Diaz Soria

*Departamento de ingeniería, Universidad Iberoamericana león,
Blvd. Jorge Vértiz Campero 1640, Fracciones Cañada de Alfaro. León, Gto. 37238.
México.
paoladiazsoria@gmail.com*

RESUMEN

La escasez de agua potable que vive la generalidad de la población da pauta para el desarrollo de una investigación en la literatura científica acerca del aprovechamiento del efecto bactericida de nanopartículas de cobre, plata, hierro y óxido de zinc en el tratamiento y desinfección de aguas residuales. En esta investigación, se comparan diferentes métodos de síntesis, así como, sus capacidades y efectos sobre las membranas de los agentes biológicos.

Palabras claves: nanopartículas (NPs), cobre (Cu), plata (Ag), hierro (Fe), zinc (Zn)

ABSTRACT

The scarcity of drinking water in the general population allowed the development of a scientific literature research on the use of the bactericidal effect of copper, silver, iron and zinc oxide nanoparticles on the treatment and disinfection of wastewater, this was made possible by comparing different synthetic methods, as well as their capacities and their effects on the membranes of biological agents.

Keywords: nanoparticles (NPs), copper (Cu), silver (Ag), iron (Fe), zinc (Zn)

Introducción

Debido a la actual escasez de agua potable, derivada del crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático, el ser humano se ha visto en la necesidad de desarrollar nuevas alternativas de solución para purificar y reutilizar aguas residuales. Por otro lado, las bacterias entéricas, los virus y los quistes protozoarios, han sido organismos potencialmente problemáticos en el agua residual, ya que han ocasionado la implementación de nuevas prácticas más seguras y económicas para la desactivación o destrucción de los

organismos patógenos del agua, un ejemplo de ello es la desinfección, sin embargo, para que esta sea efectiva, el agua debe de ser tratada adecuadamente. (Noriega-Treviño, M. E, 2012).

Es por ello, que los problemas emergentes de contaminación ambiental en el mundo requieren que continuamente se innoven técnicas para la remediación y tratamiento de recursos naturales. (Chávez-Lizárraga, 2018).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), siete de las 13 regiones hidrológico-administrativas en



las que se divide el territorio nacional sufren de un alto grado de estrés hídrico (CONAGUA 2015). El 77% de la población nacional se concentra en regiones donde solo se dispone de 31% de fuentes de agua viables para su consumo (CONAGUA 2015). El Consejo Consultivo de Agua (CCA) afirma que 2/3 de nuestro territorio se considera árido o semiárido, y casi 80% de la población del país se concentra en esa zona (CCA, 2017). La región que corresponde al Valle de México donde se concentra una gran parte de la actividad industrial del país y donde se presenta el mayor índice poblacional por metro cuadrado, experimenta un estrés hídrico crítico constante, ya que existe un desequilibrio entre la disponibilidad media del agua y la demanda de este recurso (Castañeda Olvera y col, 2018); y se espera un aumento de 2.6 millones de habitantes para el año 2030, cuyo acceso al recurso hídrico estará sujeto a una limitada disponibilidad (CONAGUA, 2015).

La respuesta gubernamental ante tal escenario ha sido insuficiente, debido a que las estrategias y políticas públicas encaminadas a solucionar esta problemática no han sido eficaces. De ahí que se busquen respuestas en la esfera científica misma (Castañeda Olvera y col, 2018). Una de las técnicas que se estudian y desarrollan en la actualidad es la nanotecnología, ya que es la solución potencial para la provisión de agua en el largo término con técnicas como la filtración, el empleo de nanopartículas

(NPs) y la desalinización (Lu & Astruc, 2018).

Se ha demostrado que las nanopartículas en general presentan dos propiedades clave que las hacen particularmente atractivas como adsorbentes en el tratamiento de aguas residuales. Una de ellas es en base a su masa, ya que poseen un área superficial mucho más grande que las partículas gruesas, y la otra es su capacidad de ser funcionalizadas con diversas especies químicas, y con ello incrementan su afinidad hacia ciertos compuestos y desarrollan propiedades únicas como adsorbentes selectivos de alta capacidad para iones y aniones metálicos (Tiwari, D.K, 2008).

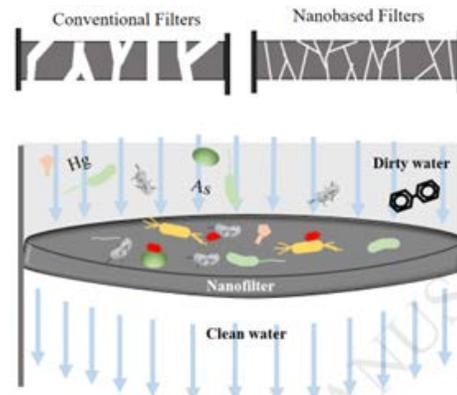


Figura 1. Acción gráfica de los filtros con nanopartículas (Khan, et al. 2019).

Por otro lado, los compuestos inorgánicos como las nanopartículas metálicas presentan gran potencial en la desinfección de aguas por su actividad antibacteriana a bajas concentraciones, debido a su estabilidad en condiciones extremas, y por ser algunos de ellos considerados como no tóxicos e incluso porque contienen



elementos minerales esenciales para el cuerpo humano (Gordon, T, et al. 2011). No obstante, varios estudios han demostrado que las NPs pueden causar daño oxidativo a las células bacterianas a través de la producción de especies oxidantes, así como provocar daño en su ADN originando carcinogénesis en las células (Puay, N. et al, 2015).

Como se mencionó con anterioridad, la nanotecnología es efectiva en tratar problemas relacionados con agua contaminada, ya que el uso de nanomateriales favorece al desarrollo de tratamientos más eficientes. (Chávez-Lizárraga, 2018). Es por eso que en el presente trabajo se analizarán 4 tipos de nanopartículas metálicas, para comparar sus propiedades bactericidas en la desinfección de agua y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, de las cuales se emplearán las siguientes NP'S: hierro, cobre, zinc y plata.

DESARROLLO

Nanopartículas de cobre

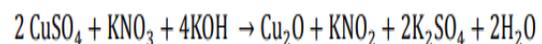
Las nanopartículas metálicas más utilizadas y estudiadas en cuanto a su efecto antibacterial son las de dióxido de titanio, plata y óxido de zinc. Sin embargo, en fechas recientes las nanopartículas de cobre (Cu NPS) han resultado un área de interés debido a sus propiedades antimicrobianas y antifúngicas, lo que las presenta como alternativas promisorias y

potencialmente viable para distintas aplicaciones. (Argueta-Figueroa, 2018)

Síntesis de nanopartículas CuO

Hidrólisis Oxidativa

Una síntesis ilustrativa se describe a continuación: En un matraz de 3 bocas de 100 mL se colocaron 1 g de CuSO_4 y 7 mL de agua desionizada, la solución se calentó a 90°C y después se le agregaron por goteo 12 mL de una solución que contenía 0.08 g de KNO_3 y 0.56 g de KOH durante un tiempo aproximado de 5 minutos, el calentamiento se mantuvo durante 1 hora. Después de transcurrido este tiempo de reacción se obtuvo un precipitado negro, el cual se lavó varias veces con agua desionizada, para después secarlo en un liofilizador y caracterizarlo. (Rodríguez, 2012).



En un estudio *in vitro* se evaluó la actividad antimicrobiana de las Cu NPs y se encontró que la concentración mínima inhibitoria (MIC) fue de 10 $\mu\text{g/ml}$ para *E. coli*, mientras que para *S. aureus* y *S. mutans* fue de 100 $\mu\text{g/ml}$, sin embargo, no se evaluó la biocompatibilidad.

Por otro lado, para las nanopartículas metálicas de cobre, se ha descrito que su formación y estabilización son procesos complejos, por lo que la fuente que suele ser usada para su síntesis con más frecuencia es el óxido de cobre (Cu_2O) que



es económico y de fácil disponibilidad. Adicionalmente, varios autores describen que su mecanismo de acción antimicrobiano es provocado por la liberación de Cu^{2+} . Estos iones de cobre pueden dañar la membrana celular bacteriana, entrar en las células y alterar su función enzimática lo que conduce a la muerte de las bacterias. Otra propiedad de las nanopartículas de cobre es que poseen una baja solubilidad en agua, lo que indica que pueden proporcionar una liberación sostenida de iones Cu^{2+} para uso a largo plazo. (Claudia Patricia Betancur Henao, 2016)

Con respecto a la bioseguridad, un estudio comparó la toxicidad y acumulación de dos compuestos de cobre diferentes, nanopartículas de CuO y CuSO_4 soluble, en eritrocitos y diferentes tejidos en trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). Los resultados de la toxicidad *in vitro* indican que ambos compuestos de cobre aumentan la tasa de hemólisis de manera dosis-dependiente, pero el efecto es menor cuando las células se tratan con nanopartículas de CuO . Además, ambos compuestos de cobre causan daño al ADN, que fue más pronunciado en las células tratadas con CuSO_4 . Las concentraciones de cobre en los riñones y las branquias fueron significativamente más altas en los peces expuestos a CuSO_4 en comparación con las nanopartículas de CuO . Se detectó un daño significativo en el ADN sólo cuando se inyectó Cu como CuSO_4 en comparación con los controles. Estos datos sugieren que las nanopartículas de Cu son

menos tóxicas que en su tamaño de macroescala. (Sánchez-Sanhueza Gabriela, 2016).

Nanopartículas de Plata (AgNPs)

La plata ha sido utilizada desde la antigüedad, principalmente para la desinfección del agua (Cardoso, 2016). Existen indicadores de que las nanopartículas de plata se encuentran presentes desde siempre en la naturaleza y que la producción deliberada de nanopartículas de plata se practica desde hace más de 100 años, siendo uno de los materiales más comúnmente utilizados. (Liangpeng, 2014)

Los diversos estados de la plata ya sea como sales, nanopartículas, etc., presentan distintas propiedades (Cardoso, 2016).

Las diferentes rutas de síntesis de NP conducen a tamaños variables, morfología, e incluso estabilidad. En general, estos métodos se pueden clasificar en tres grandes categorías: síntesis física, química y biológica (o verde).

Síntesis física

Los métodos top-down involucran usualmente la molienda o desgaste; mientras que en las técnicas bottom-up comienzan con un precursor de la sal de plata que es reducido en una reacción química.



Síntesis química

La reducción química es el método más frecuente de síntesis de nano plata, utilizando para ello sales de plata, reductores y un estabilizante o agentes de terminación para controlar su crecimiento, el nitrato de plata es frecuentemente utilizado para las Ag-NP, debido a su bajo costo y estabilidad química comparada con otras sales disponibles.

Síntesis biológica

Este método de síntesis utiliza agentes reductores y de terminación ecológicos, como son, las proteínas, péptidos, carbohidratos, varias especies de bacterias, hongos, levaduras, algas y plantas. (Cardoso, 2016)

Mecanismo de acción de Ag-NP

El mecanismo de acción microbicida de las nanopartículas de plata (Ag-NP) parecen depender de su tamaño. Las Ag-NP de hasta 80 nm pueden penetrar en la membrana bacteriana interior y exterior, mientras que las Ag-NP con diámetro menor a 10 nm ocasionan fuga citoplasmática por la formación de poros sobre la pared de la célula bacteriana, pero no afectan las proteínas extracelulares del ácido nucleico bacteriano (Cardoso, 2016). Cuando la respiración de las bacterias es expuesta a los diferentes componentes de la plata y realiza contacto con la membrana interrumpe la cadena respiratoria y colapsa

la fuerza motriz de electrones acabando con la producción de ATP (Adenosin Trifosfato) y sus fuentes de energía. La distribución de la plata debe ser uniforme en los filtros asegurando el contacto directo con las bacterias a través del mismo utilizado como una medida antibacteriana. (Montoya y col., 2014)

Varios estudios han dejado ver que la utilización de nanopartículas de plata y los materiales utilizados en estos experimentos son de bajo costo y el uso es óptimo para conseguir un efecto antibacteriano a partir de filtración de agua (Montoya y col., 2014).

Thomas y col. desarrollaron una solución económica para preparar películas con nano plata y quitosano a gran escala (400 nm), utilizando quitosano como un agente quelante y estabilizante; las películas mostraron una acción antibacteriana excelente contra *Escherichia coli* y *Bacillus*. Con la combinación de polímeros apropiados, se puede potenciar la actividad antimicrobiana de la plata, además de su sustentabilidad, y disminución de la toxicidad (SCENIHR, 2014)

Se ha evaluado también la actividad antifúngica de las nanopartículas de plata. La incorporación y concentración de nanopartículas de plata al medio de cultivo, provocó una disminución importante en la velocidad de crecimiento del hongo, la cual estuvo en función de la concentración de nanopartículas de plata. Empleando una



concentración de 52 microgramos de plata/mL de medio de cultivo, fue posible inhibir el crecimiento del fitopatógeno en casi 90%. (Petica y col. 2008) La velocidad de crecimiento del hongo disminuyó a medida que la concentración de nanopartículas de plata aumentó en el medio de cultivo. (Aguilar y col. 2010)

Respecto a la toxicidad de las nanopartículas de plata, algunos estudios han demostrado que la toxicidad intrínseca de las nanopartículas de plata depende de una serie de factores como son el tamaño, la forma, el área superficial, la carga superficial, la solubilidad y el estado de aglomeración. (Carlson y col., 2008; Choi y Hu, 2008; Horie y col., 2012).

El tamaño es una de las propiedades más importantes de las NPs. Muchas publicaciones han demostrado que la toxicidad de las AgNPs depende del tamaño (Carlson y col., 2008; Choi y Hu, 2008). Además, el tamaño de las AgNPs también influye en la distribución tisular (De Jong y col., 2008), en la penetración dermal e intestinal (Sonavane y col., 2008) y en la captación celular (Chithrani y col., 2006). En general, los mayores efectos tóxicos han sido observados con las AgNPs más pequeñas.

El tamaño y la superficie específica de las NPs están en estrecha relación, ya que conforme disminuye el tamaño de las AgNPs la superficie específica aumenta dejando un mayor número de átomos expuestos en la superficie, que estarán disponibles para las reacciones redox, reacciones fotoquímicas y para interacciones físicoquímicas con las células (Ávalos, A y col., 2013).

La estabilidad de las AgNPs también influye en la toxicidad. Las NPs tienen una tendencia natural a formar aglomerados o agregados (Oberdorster et al., 2005). Los aglomerados son grupos de partículas unidas mediante fuerzas relativamente débiles de tipo Van der Waals, electroestáticas o de tensión superficial, que pueden dispersarse por medios mecánicos. Mientras que los agregados son grupos de partículas fuertemente asociadas cuya dispersión por medios mecánicos no resulta fácil. Estos dos fenómenos pueden cambiar el lugar de depósito de las AgNPs en el organismo, ya que un agregado o aglomerado de NPs se deposita en unas zonas u otras debido al distinto diámetro dinámico. Además, también modifica la toxicidad, ya que, al ser una estructura relativamente compacta, el área superficial es menor y por tanto la toxicidad será menor (Galvez y Tanarro, 2010).

La forma también influye en la toxicidad de las AgNPs. Se ha comprobado que las formas de triángulo truncado son más tóxicas que las formas esféricas y alargadas, ya que contienen más caras y por tanto son más reactivas (Pal y col., 2007), siendo las esféricas las que presentan menor toxicidad (Ávalos, A y col., 2013).

Cuando las NPs se disuelven pierden su estructura de NPs y las propiedades toxicológicas específicas de éstas, siguiendo entonces consideraciones toxicológicas similares a las de otro contaminante con efectos sistémicos (Gálvez y Tanarro, 2010). Luoma (2008) sugirió que tras la ingestión de plata (no específicamente NPs) es probable que se convierta en la forma iónica debido al bajo pH del estómago.



Se observó que las AgNPs estabilizadas con citrato con cargas superficiales negativas fueron menos citotóxicas que las AgNPs con cargas superficiales positivas estabilizadas con polietilenimina ramificada. Incluso con la misma composición química, las NPs presentan diferentes propiedades fisicoquímicas siendo estas diferencias un factor importante. Por tanto, es importantísimo realizar una caracterización detallada de cada una de las NPs (Ávalos, A y col., 2013).

Como ocurre con otras NPs, la toxicidad de las AgNPs parece estar asociada con su naturaleza oxidativa e inflamatoria (Cho y col., 2009), la cual genera genotoxicidad (Asharani y col., 2009) y citotoxicidad (Hussain y col., 2005). Algunos investigadores sugieren que la toxicidad de las AgNPs se debe a la liberación de Ag^+ , ya que según sus estudios ambos presentan una respuesta biológica similar (Miura y Shinohara, 2009). En contraste, Kim y col. (2009) y Asharani y col. (2008) sugirieron que la toxicidad inducida por las AgNPs es independiente de los Ag^+ libres. Por ello es sumamente necesario que los productos fabricados con AgNPs sean seguros tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Nanopartículas de Óxido de Zinc

El óxido de zinc es un material semiconductor, que tiene la característica de ser de baja toxicidad para el ser humano a bajas concentraciones. Las nanopartículas han sido utilizadas para remover el arsénico del agua (Tiwari, D.K,

2008), y presentan un efecto antimicrobiano contra bacterias como *E.coli* en ausencia de luz y a un pH neutro, (Corrales Ureña, Y. R, 2017) por lo que su ventaja radica en que ayuda a evitar la formación de una biopelícula provocada por microorganismos patógenos presentes en el agua, y de esta manera reduce el costo en el proceso de ósmosis inversa y nanofiltración (Noriega-Treviño, M. E, 2012). En pocas palabras, el ZnO es considerado como un material importante que ofrece ventajas en términos de bajos costos, respeto al medio ambiente y capacidad de adsorción de amplio espectro. Sin embargo, presenta algunas limitaciones como la dificultad para ser separado y con ello reciclado de una solución, una alta aglomeración en soluciones acuosas, así como una baja eficiencia catalítica (He, X, 2019).

Las NPs de ZnO han demostrado ser muy efectivas en la inhibición del crecimiento de un amplio espectro de bacterias. Su mecanismo para la actividad antibacteriana se basa principalmente en que catalizan la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) agua y oxígeno, que interrumpen la integridad de la membrana bacteriana. Dado que el proceso de catálisis en la formación de radicales se produce en la superficie de las partículas, las partículas con una mayor superficie son las que presentan una actividad antibacteriana más fuerte. Por lo tanto, si el tamaño de las partículas ZnO disminuye, su actividad antibacteriana aumenta (Gordon, T, et al. 2011). No



obstante, las NPs de ZnO pueden causar daños en la pared celular y en la membrana de las bacterias debido al simple efecto abrasivo por la fuga de materiales intracelulares (Muzaffar, et al. 2020).

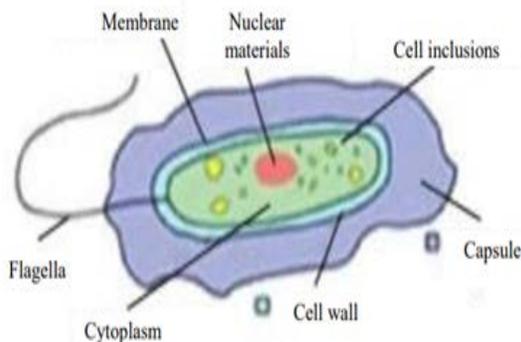


Figura 2. Estructura celular bacteriana (Muzaffar, et al. 2020).

Otro mecanismo de acción de estas nanopartículas es a través de la inducción de un estrés oxidativo en ciertos microorganismos por medio de la regulación ascendente de los genes de estrés oxidativo tras la exposición a ZnO, y la liberación de iones de zinc que contribuyen a su actividad antimicrobiana (Khan, et al. 2019).

Para la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc se deben de mezclar soluciones con cantidades estequiométricas de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) e hidróxido de sodio (NaOH) además de dextrina como estabilizante. Su caracterización se realiza a través de las técnicas de Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) y Dispersión Dinámica de la Luz (DDL), mientras que la evaluación de la inhibición del crecimiento de microorganismos

patógenos es por medio de una placa de buffer de fosfato (PBS) con Luria Bertani (LB). (Corrales Ureña, Y. R, 2017).

De acuerdo con los estudios realizados por Noriega-Treviño et al., las nanopartículas de zinc a bajas concentraciones han demostrado ser poco eficientes en su uso como bactericidas. No obstante, a menor tamaño de partícula y mayor concentración, estas provocan una mejor inhibición del crecimiento del microorganismo, por lo que lo ideal es hacer una comparación de la actividad antimicrobiana de nanopartículas de ZnO con una relación área superficial/masa de partícula similar, para determinar el efecto de la morfología entre el contacto de la célula y la partícula (Corrales Ureña, Y. R, 2017).

Por otro lado, una evaluación realizada por Salem y colegas demostró que las nanopartículas de ZnO exhiben una actividad antimicrobiana superior que las NPs de plata contra *E. coli* y *Vibrio cholerae* gracias a que las NPs de ZnO inhiben la actividad de la enzima adenilil ciclasa, la cual está implicada en la patogenicidad de muchas bacterias (Salem et al., 2015).

Nanopartículas de Hierro

El hierro es un elemento de los más abundantes en la corteza terrestre y es un micronutriente esencial para todos los organismos vivos (Heitbrink, 2015). Su disponibilidad se encuentra limitada por ser un elemento de baja solubilidad y lenta



velocidad de disolución en fases con minerales que contienen hierro, especialmente en soluciones de pH neutras o alcalinas (Hurrell, 2002).

En los últimos años, el interés en las nanopartículas magnéticas ha ido creciendo debido al gran número y espectro de aplicaciones que poseen, que van desde aplicaciones en biomedicina a la obtención de imágenes por resonancia magnética, administración de drogas y tratamientos contra el cáncer, por lo que son consideradas biomateriales debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad (Del Rio, 2014).

Las nanopartículas magnéticas de hierro destacan en el campo ambiental, una de sus principales aplicaciones es la remediación de suelos y agua. Son nanopartículas de baja toxicidad, de fácil separación, diminuto tamaño y alta reactividad (Saltos, 2016)

Existen varias técnicas para sintetizar las nanopartículas, entre las principales se encuentran la coprecipitación química, el método hidrotérmico, sol-gel, microemulsión, inyección de flujo, entre otras (Corredor, 2007).

El método de coprecipitación química

Este método consiste en la utilización de precursores metálicos inorgánicos (cloruros, nitratos, sulfatos) en una solución acuosa y es considerada como la ruta química húmeda más directa y

eficiente para la síntesis de nanopartículas magnéticas (Ramimoghadam, 2014).

El método hidrotérmico

Se encuentra entre las técnicas más conocidas de generación de FeNPs, donde los precursores de hierro en solución acuosa pueden calentarse a alta temperatura y con presión autógena por lo que las reacciones se llevan a cabo en medios acuosos en autoclaves de acero (Noval, 2016).

La ruta Sol- Gel

El proceso sol-gel es generalmente un método químico apropiado (húmedo), para la generación de nanoestructuras de óxidos metálicos. Este proceso incluye la hidroxilación y la condensación del precursor en solución originando un “sol” de partículas nanométricas. La condensación adicional y la polimerización inorgánica hacen que se forme una red de óxido de metal denominada gel húmedo. Las propiedades del gel dependen en gran medida de la estructura formada dentro de la etapa sol y los principales factores que afectan esta etapa son las reacciones de hidrólisis y de condensación, la velocidad de éstas y el pH, factores que tienen gran influencia en el crecimiento y por consecuencia en el tamaño y morfología de las nanopartículas (Maliar, 2012).



Método de microemulsión

Consiste en la formulación de una solución transparente que poseen pequeñas gotas de una fase inmiscible, no polar o polar, dispersas en una fase continua (aceite). La presencia de surfactantes lleva a disminuir la tensión superficial entre las fases continua e inmiscible y mantiene las gotas estables, siendo responsables de la formación de micelas que pueden dispersar las FeNPs, por lo que es un método que permite sintetizar nanopartículas con diferentes morfologías y estructuras auto ensambladas.

Inyección de flujo

La inyección de flujo es una técnica que involucra la mezcla continua o separada de reactivos bajo un régimen de flujo laminar dentro de un reactor capilar y tiene varios beneficios, como una alta homogeneidad de mezclado, alta reproducibilidad y la posibilidad de un control externo. Las FeNPs producidas usando esta técnica muestran una distribución de tamaño de partícula pequeño que oscila entre 2 y 7 nm (Méndez, 2019).

Las nanopartículas de hierro presentan un alto grado de toxicidad para el ser humano cuando se encuentran a bajas concentraciones ($<40\mu\text{g/mL}$) puesto que, ingresan a las células endoteliales microvasculares del cerebro por medio de endocitosis a la membrana plasmática. Finalmente, pueden considerarse como un primer acercamiento a los mecanismos

implicados por lo que las NPs de hierro pueden ingresar al sistema nervioso central (Gárate, 2018).

Las FeNPs no muestran ninguna propiedad antibacteriana (Padilla, 2018). Si se desea obtener nanopartículas de hierro con propiedades antimicrobianas se necesita realizar una síntesis de nanopartículas bimetálicas, pudiendo ser Ag-Fe NPs por ejemplo. Y el mecanismo en que éstas actúan es adhiriéndose a lipopolisacáridos, lípidos y porinas que se encuentran en la pared celular de las bacterias (especialmente bacterias gram negativas) y de esta manera comienzan a desnaturalizar la membrana haciendo así, que la bacteria muera por acción de las nanopartículas de plata, por lo que las nanopartículas de hierro únicamente sirven como un transporte para poder dirigir las AgNPs a la zona deseada. (Neal, 2015)

Además de comprender y controlar la síntesis y las aplicaciones de las NPs, la caracterización de las NPs se puede llevar a cabo utilizando una variedad de técnicas como por ejemplo, la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) (determina el tamaño del núcleo metálico), la Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (mide el tamaño de la NP y su distribución), la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), y por último, a través de la Dispersión de Luz Dinámica (DLS) (determina el radio hidrodinámico, esto es, el tamaño de la NP, núcleo + corona + capa de disolvente) (Choi y col., 2007; Yoosaf y col., 2007). La composición de las NPs se puede determinar utilizando la



Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos X (XPS) (mide el estado de oxidación orgánica de las NPs), por Espectrometría de Emisión Atómica con Fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) y, por último, por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA), (ambas determinan la concentración de metal). Otras técnicas que también se podrían emplear para la caracterización de las NPs son la Espectrometría de Infrarrojo (IR) y la Espectrofotometría de Ultravioleta-Visible (UV-Vis), entre otras (Anghel y col., 2013).

Conclusión

Como se ha mencionado, se ha reportado que las nanopartículas de Ag y ZnO poseen buenas propiedades bactericidas, que le permiten ser utilizadas en el tratamiento y desinfección de aguas residuales, frente a las NPs de Cu y Fe, sin embargo, haciendo una comparación entre ellas, se puede concluir que las NPs de plata son más costosas y susceptibles a la oxidación, lo que reduce su propiedad como agente antimicrobiano, mientras que las NPs de ZnO tienen como ventaja su alta estabilidad, su bajo costo y su baja toxicidad. No obstante, si las nanopartículas de ZnO son relativamente grandes en cuanto a tamaño de partícula e hidrofóbicas, el proceso de desinfección sería ineficiente, por lo que se debería de cuidar este último detalle.

En cuanto a las nanopartículas de cobre, si es bien sabido que uno de sus precursores, el óxido de cobre no es tan costoso como

los de plata y presenta estabilidad química y física, su actividad antimicrobiana no ha sido bien establecida, ya que el mecanismo involucrado sigue siendo incierto por lo que no se han obtenido conclusiones contundentes, pero se cree que, por su área superficial extremadamente alta y su morfología cristalina inusual, puede ser que CuO sea un agente antimicrobiano potencial en la desinfección de aguas.

Por otro lado, las nanopartículas de hierro presentan una ventaja sobre las otras tres, y es que poseen la propiedad de magnetizarse espontáneamente, lo que le permite remover metales pesados de las aguas residuales, sin embargo, las nanopartículas de hierro por sí solas no son capaces de producir algún efecto antibacteriano significativo, para ello se necesita realizar nanopartículas bimetalicas como la de Ag-Fe o nanopartículas de óxido de hierro que a bajas concentraciones producen un gran estrés oxidativo a la membrana bacteriana.

Las NPs pueden ser agentes potenciales de desinfección de aguas residuales, ya que presentan propiedades específicas e importantes en la remoción de agentes patógenos y metales pesados, pero, debido a que es una nueva área en desarrollo, son aún escasos los estudios que se han desarrollado, por lo que, para obtener un fundamento más sólido y pruebas más contundentes sobre su actividad, se recomendaría realizar más investigaciones al respecto. Por el momento, las NPs de ZnO son las que presentan mejor



eficiencia en cuanto su uso, toxicidad y costo.

Referencias

Aguilar Méndez, M. A., Martínez, E., Ortega L., Cobian, G. (2010). Evaluación de la Actividad Antifúngica de Nanopartículas de plata,(s.p), Oaxaca, Mexico:AMIDIQ.

Anghel, I., Grumezescu, A.M., Holban, A.M., Ficai, A., Anghel, A.G. y Chifiriuc, M.C. (2013). Biohybrid nanostructured Iron oxide nanoparticles and *Satureja hortensis* to prevent fungal biofilm development. *Int J Mol Sci.* [Doi: 10.3390/ijms140918110](https://doi.org/10.3390/ijms140918110).

Argueta-Figueroa, L. (2018). Acrílico termopolimerizable enriquecido con nanopartículas de cobre: evaluación antibacteriana y citotóxica. *SCIELO*, ciudad de Mexico, Mexico: Epub.

Asharani, P. V. Wu, Y. L., Gong, Z. Y Valiyaveetil, S. (2008) Toxicity of silver nanoparicles in zebrafish models. *Nanotechnology.* [Doi: 10.1088/0957-4484/19/25/255102](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/25/255102).

Asharani, P. V., Mun, G.L.K., Hande, M.P., y Valiyaveetil, S. (2009). Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparicles in human cells. *ACS Nano.* [Doi: 10.1021/nn800596w](https://doi.org/10.1021/nn800596w).

Ávalos, A., Haza, A.I., Mateo, D. y Morales, P. (2013). Nanopartículas de plata: aplicaciones y riesgos tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. Dpto. Nutrición, Bromatología y Tecnología de los alimentos UCM. ISSN: 1988-2688.

Cardoso, P.C. (2016). Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. *Rev. Hosp. Niños (B. Aires).*

Carlson, C., Hussain, S. M., Schrand, A. M., Braydich-Stolle, L. K., Hess, K. L., Jones, R. L. y Schlager, J. J. (2008). Unique cellular interaction of silver nanoparticles: size dependent generation of reactive oxygen species. *J Phys Chem B.* [Doi: 10.1021/jp712087m](https://doi.org/10.1021/jp712087m).

Castañeda Olvera, J. D., Foladori, G., León Silva, S. y Robles-Belmont, E. (2018). Panorama de la investigación y desarrollo de las nanotecnologías para el tratamiento de agua en México. Universidad Autónoma de Zacatecas, México. ISSN: 2215-2172.

CCA (Consejo Consultivo del Agua). (2017). Panorama del agua en México. Recuperado de <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/agua-en-mexico>.



Chávez-Lizárraga, G.A. (2018). Nanotechnology an alternative for wastewater treatment: Advances, Advantages and Disadvantages. Journal of the Selva Andina Research Society. ISSN: 2072-9308. San Pablo, Bolivia.

Chithrani, B. D., Ghazani, A. A. y Chan, W. C. W. (2006). Determining the size and shape dependence of gold nanoparticle uptake by mammalian cells. *Nano Lett.*

Choi, O. Y Hu, Z. (2008). Size dependent and reactive oxygen species related nanosilver toxicity to nitrifying bacteria. *Environ Sci Technol.*

Claudia Patricia Betancur Henao, V. H. (2016). Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio. *SCIELO*, Ne.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2015) Num3ragua. México: Semarnat.

Corrales Ureña, Y. R., Vieira Nascimento, M., Faccioni, J., Alfaro, B., Rischka, K., Vega Baudrit, J., & Lisboa Filho, P. N. (2017). Actividad antimicrobiana de nanopartículas de óxido de Zinc (ZnO) con diferentes morfologías sintetizadas empleando ultrasonido.

Corredor, J. Echeverria, F. (2008) Síntesis de óxidos de hierro nanoparticulados.

De Jong, w. H., Hagens, W. I., Krystek, P. Y Geertsma, R. E. (2008). Particle size-dependent organ distribution of gold nanoparticles after intravenous administration. *Biomateriales*. [Doi: 10.1016/j.biomateriales.2007.12.037](https://doi.org/10.1016/j.biomateriales.2007.12.037).

Del Rio Clar M. (2014) Aplicación de nanopartículas magnéticas de hierro a la eliminación de mercurio del agua.

Gálvez, V. Y Tanarro, C. (2010). Toxicología de las nanopartículas. Seguridad y salud en el trabajo.

Gárate, L. (2018) Toxicidad de nanopartículas magnéticas en un modelo in-vitro de barrera hematoencefálica.

Gordon, T., Perlstein, B., Houbara, O., Felner, I., Banin, E., & Margel, S. (2011). Synthesis and characterization of zinc/iron oxide composite nanoparticles and their antibacterial properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 374(1-3), 1-8.

He, X., Yang, D. P., Zhang, X., Liu, M., Kang, Z., Lin, C., ... & Luque, R. (2019). Waste eggshell membrane-templated CuO-ZnO nanocomposites with enhanced adsorption, catalysis and antibacterial properties for water purification. *Chemical Engineering Journal*, 369, 621-633.

Heitbrink, W. (2015). Exposure controls for nanomaterials at three manufacturing sites.



Horie, M., Hato, H., Fujita, K. Y Iwahashi, H. (2012). In vitro evaluation of celular response induced by manufactured nanoparticles. *Chem Res Toxicol.* [Doi: 10.1021/tx200470e](https://doi.org/10.1021/tx200470e).

Hurrell, R. (2002) How to Ensure Adequate Iron Absorption from iron-fortified food.

Hussain, S.M, Hess, K.L., Gearhart, J.M., Geiss, K.T. y Schlager, J.J. (2005) In vitro toxicity of nanoparticles in BRL 3A rat liver cells. *Toxicol In vitro.*

Khan, S. T., & Malik, A. (2019). Engineered nanomaterials for water decontamination and purification: From lab to products. *Journal of hazardous materials*, 363, 295-308.

Kim, S., Choi, J.E., Choi, J., Chung, K., Park, K. Y Ryu, D. (2009) Oxidative stress-dependent toxicity of silver nanoparticles in human hepatoma cells. *Toxicol In vitro.* [Doi: 10.1016/j.tiv.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.06.001).

Liangpeng Ge et al. (2014). Nanosilver particles in medical applications: synthesis, performance, and toxicity. *International Journal of Nanomedicine.*

Lu F, Astruc D. (2018). Nanomaterials for removal of toxic elements from wáter. *Coord Chem Rev.*

Luoma, S. N. (2008). Silver nanotechnologies and the enviroment: old problems or new challenges. The Pew Charitable Trusts and the Woodrow International Center for Scholars.

Maliar, T. (2012) Electrochemical Aspects of the synthesis of iron particles.

Méndez Mantuano M. O., Boderó, K., Alvarado, D. Huayamave, A., Apolo, D. (2019) Biosíntesis de nanopartículas de hierro en la remediación de aguas contaminadas.

Miura, N. Y Shinohara Y. (2009). Cytotoxic effect and apoptosis induction by silver nanoparicles in HeLa cells. *Biochem Biophys rES cOMMUN.* [DOI: 10.1016/J.BBRC.2009.10.039](https://doi.org/10.1016/J.BBRC.2009.10.039).

Montoya, N., y col. (2014). Estudio de un sistema piloto de filótracin de agua recubierto con nanoparticulas de plata. *Semilleros*, 1(1), 105-116.

Muzaffar, S., Aslam, M. N., Rehman, S., Umer, S., Ahmed, S., Zahra, S. R., ... & Anwar, H. (2020, May). A simple and low-cost purification method for microbial-free water using zinc oxide nanoparticles. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 863, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.



Neal, A. (2015) what can be inferred from bacterium-nanoparticle interactions about the potential consequences of environmental exposure to nanoparticles?

Ng LY, Mohammad AW, Leo CP, Hilal N. (2010). Polymeric membranes incorporated with metal/metal oxide nanoparticles: A comprehensive review. *Desalination*.

Noriega-Treviño, M. E., González, C. C. Q., Pacheco, J. M. G., Sánchez, J. E. M., Jasso, M. E. C., & Ruiz, F. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y ciencias del agua*, 3, 87-100.

Noval, E. (2016) Magnetita: una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones.

Oberdorster, G., Oberdorsert, E. Y Oberdorter, J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*.

Padilla, A. (2018) Niosíntesis de nanopartículas bimetálicas (Ag-Fe) caracterización y evaluación de sus propiedades bactericidas.

Pal, S., Tak, Y. K. Y Song, J. M. (2007). Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium

Escherichia coli. *Appl Environ Microbiol*.

Petica, A., Graviliu, S., Lungu, M., Buruntea, N. Y Panzaru, C. (2008). Colloidal silver solutions with antimicrobial properties. *Materials Science and Engineering*.

Puay, N. Q., Qiu, G., & Ting, Y. P. (2015). Effect of Zinc oxide nanoparticles on biological wastewater treatment in a sequencing batch reactor. *Journal of Cleaner Production*, 88, 139-145.

Ramimoghadam, S. Bagheri, S. Abd Hamid, Progress in electrochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles.

Rodríguez, P. Y. (Ne de Noviembre de 2012). *Centro de investigación en química aplicada*. obtenido de síntesis y caracterización de nanopartículas de cobre y óxido de cobre y su incorporación en una matriz polimérica y el estudio de sus propiedades antibacterianas: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/166/1/Pamela%20Yajaira%20Reyes%20Rodriguez%20maestria.pdf>

Salem, W., Leitner, D.R., Zingl, F.G., Schratte, G., Prassl, R., Goessler, W., Reidl, J., Schild, S., 2015. Antibacterial activity of silver and zinc nanoparticles against *Vibrio cholerae* and enterotoxic.



Salto Estrella C. V. (2016) Síntesis de nanopartículas de hierro cerovalentes /FeNPs) usadas para la remoción de colorantes en agua.

Sánchez-Sanhueza Gabriela, F.-R. D.-T. (2016). Nanopartículas de Cobre como Potencial Agente Antimicrobiano en la Desinfección de Canales Radiculares. Revisión Sistemática. *SCIELO*.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). (2014). European Commission. Nanosilver safety, health and environmental effects and role in antimicrobial resistance.

Sonavane, G., Tomoda, K., Sano, A., Ohshima, H., Terada, H. Y Makino, K. (2008). In vitro permeation of gold nanoparticles through rat skin and rat intestine: effect of particle size. *Coll. Surf. B. Biointerfaces*. [Doi: 10.1016/j.colsurfb.2008.02.013](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.02.013).

Tiwari, D. K., Behari, J., & Sen, P. (2008). Application of nanoparticles in waste water treatment 1.

Yoosaf, K., Ipe, B., Suresh, C.H. y Thomas K.G. (2007). In situ synthesis of metal nanoparticles and selective naked-eye detection of lead ion from aqueous media. *J Phys Chem C*.