

El potencial de las nanopartículas de Ag y Cu para la fabricación de recubrimientos fotocatalíticos para mitigar la propagación de la COVID-19

The potential of Ag and Cu nanoparticles for the manufacture of photocatalytic coatings to mitigate the spread of COVID-19

Fabricio Espejel Ayala,^{1,*} Yolanda Reyes Vidal¹ y Miriam Solís López²

ABSTRACT: In this work, the use of photocatalytic and antimicrobial nanoparticles (NPs) is shown as an alternative to mitigate the virus SARS-CoV-2, which causes the COVID-19. The work is structured with emphasis in the mechanisms followed by Ag and Cu NPs to inactivate virus and bacteria. Furthermore, the preparation of materials, as zeolites, impregnated with NPs of Ag and Cu is presented. Also, the use of other type of NPs, like ZnO and TiO₂ is treated, presenting high efficiency to inactivate microorganisms. Finally, the studies presenting the use of NPs supported or non-supported to prepare photocatalytic coatings are revised. These coatings were evaluated to degrade air pollutants; however, their use as antimicrobial agents is of high interest. Knowing the antimicrobial properties of NPs to remove microorganisms, their applications can be extended to inactive viruses, such as the SARS-CoV-2. This would encourage the use of these coatings in places presenting important outbreaks of COVID-19 and hospitals.

KEYWORDS: photocatalysis, copper, silver, titanium dioxide, microorganisms, virus.

RESUMEN: En el trabajo se aborda el uso de diferentes tipos de nanopartículas (NPs) con propiedades fotocatalíticas y antimicrobianas, con posible uso en la mitigación de la propagación del virus SARS-CoV-2 que provoca la enfermedad COVID-19. El trabajo está estructurado con énfasis en el mecanismo por el cual las NPs de Ag y Cu pueden eliminar virus y bacterias. Posteriormente, se aborda la preparación de materiales, como las zeolitas, que contienen impregnadas las NPs de Ag y Cu. Otras de las NPs presentadas son las de ZnO y TiO₂, las cuales también presentan alta eficiencia para eliminar microrganismos. Por último, se analizan algunos trabajos en donde las NPs, en suspensión o soportadas, se emplearon para preparar recubrimientos fotocatalíticos, los cuales fueron evaluados para la degradación de algunos contaminantes atmosféricos; no obstante, lo más interesante fue su uso como recubrimientos antibacterianos. Si bien, la mayoría de los trabajos analizados se enfocan en comprobar las propiedades antimicrobianas de los recubrimientos fotocatalíticos, su uso se puede extender hacia la inactivación de virus, como el SARS-CoV-2. Esto permitiría utilizar estos recubrimientos en zonas con alta presencia del virus, como es el caso de hospitales o áreas de alto contacto humano.

PALABRAS CLAVE: fotocatálisis, cobre, plata, dióxido de titanio, microrganismos, virus.

Recibido: 20 de diciembre de 2020.

Aceptado: 17 de mayo 2021.

¹Centro de investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. Parque Tecnológico Querétaro.

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología.

*Autor de correspondencia: fespejel@cideteq.mx

Introducción

En atención a la emergencia sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2, causante de la enfermedad COVID-19, se han propuesto diversas técnicas y estrategias para mitigar su propagación. Entre las más utilizadas se encuentran el lavado de manos frecuente, el uso de mascarillas (cubrebocas) y la sana distancia, además del distanciamiento social. En algunos casos se utilizan mascarillas con componentes antimicrobianos, de los cuales, el cobre es el de mayor uso. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (US EPA) aprobó el uso de aleaciones de Cu en utensilios de contacto clínico, dado su poder antimicrobiano (Green, 2014). De acuerdo con los estudios hasta ahora realizados, los iones de Cu generan daño en la membrana celular de las bacterias, ocasionando pérdida del contenido del citoplasma. También, las especies reactivas de oxígeno (ERO), tales como $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$, y H_2O_2 (Wu *et al.*, 2018), las cuales se liberan en presencia de los iones de Cu, inducen daño celular y la degradación del ácido desoxirribonucleico (ADN) (Bleichert *et al.*, 2014; Hans *et al.*, 2016; Grass *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2017). Entre los microorganismos susceptibles a la acción de los iones de Cu se tienen: *Escherichia coli*, *Enterococcus hirae*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella entérica*, *Listeria monocytogenes* y *Mycobacterium tuberculosis* (Bleichert *et al.*, 2014). Además, los iones de Cu^{+2} se han evaluado para la inactivación de norovirus (Bleichert *et al.*, 2014), coronavirus y calcivirus felino (Bright *et al.*, 2009), entre otros. En este sentido, el proceso de fotocatálisis empleando materiales nanoparticulados de Cu ha demostrado ser eficiente para atacar los microorganismos en el agua y el aire (Wu *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2017, Bright *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2018; Chuang *et al.*, 2017; Malato *et al.*, 2016). Ya sea por la liberación de ERO o por los radicales libres generados en el proceso de fotocatálisis, las nanoparticulas de Cu pueden ser una alternativa para la inactivación del virus SARS-CoV-2, tanto en fluidos como en el aire.

El uso de compuestos sanitizantes y desinfectantes resulta controversial, debido a que pueden provocar efectos secundarios en virtud de los compuestos químicos que contienen los productos comerciales, como las soluciones de alcohol, el dióxido de cloro y las sales cuaternarias de amonio. Estos compuestos nocivos alcanzan el sistema de drenaje y se pueden esparcir en el medio ambiente a través del agua residual. Inclusive, el ser humano se encuentra expuesto a esas sustancias debido a que el tamaño de sus moléculas es todavía menor que el del coronavirus que se intenta neutralizar, por lo que es más probable que estos contaminantes sean aspirados o ingeridos, causando efectos nocivos a la salud humana. Una alternativa para disminuir el consumo de agentes comerciales que contienen sustancias perniciosas para el ser humano y el ambiente es el uso de recubrimientos fotocatalíticos de alta permanencia y de acción antimicrobiana y viricida. Estos recubrimientos son capaces de inactivar virus y eliminar otros microorganismos, tales como bacterias y agentes micóticos. En esta revisión se hará un



compendio de los materiales nanoestructurados utilizados para tales fines, analizando la utilización de NPs de Cu, Ag, ZnO y TiO₂ como principales agentes antimicrobianos y viricidas, ya sea en suspensión o soportados en otros materiales, formando nanocompositos.

Nanopartículas de Cu

Las NPs de Cu tienen un comprobado efecto antimicrobiano debido a tres mecanismos (Charttejee *et al.*, 2014).

1. Cambio de permeabilidad en la membrana celular, debido a la acumulación y disolución de las NPs, lo que produce la desestabilización de los lipopolisacáridos y las proteínas de la membrana y con ello la liberación de biomoléculas intracelulares, además de la interrupción del movimiento de protones a través de la membrana celular.
2. La generación de ERO que dañan las estructuras celulares.
3. La absorción de iones metálicos formados por las NPs, seguido por la disminución en la producción intracelular de adenosín trifosfato (ATP).

Todo lo anterior se basa en la capacidad que tiene el Cu para aceptar/donar electrones, y así generar los radicales hidroxilo y las ERO. A su vez, en este proceso se genera la especie peróxido de hidrógeno (H₂O₂), lo cual sugiere que la reacción tipo Fenton también es parte del mecanismo que genera las propiedades antimicrobianas del Cu. La ecuación 1 muestra la generación de los radicales •OH mediante la reacción de Fenton (Koniczny y Rdzawsky, 2012).



Debido a la acción de los iones Cu⁺² sobre los grupos tiol en las estructuras proteicas de la membrana bacteriana, la estabilidad de la célula se ve seriamente comprometida y los procesos de regeneración son rebasados conforme aumenta la concentración intracelular y extracelular de Cu⁺². Más aún, dado que el grupo tiol es fundamental en los mecanismos de desintoxicación bacteriana, la célula muere debido a la presencia de los radicales generados por las NPs de Cu.

El tamaño de la NP tiene relación directa con la actividad antimicrobiana del Cu. Por ejemplo, Auchynnika *et al.* (2015) demostraron que las NPs de Cu de entre 15 y 40 nm cuentan con una elevada actividad antimicrobiana (100%) para la eliminación de *E. coli*, cuando la concentración es de 0.75% (w/v), mientras que a menores concentraciones (0.25 y 0.5%), la actividad antimicrobiana también disminuye de manera significativa. Al respecto, los hallazgos de Zakharova *et al.* (2015) demostraron que las NPs de Cu tan grandes como 50 nm son efectivas para inactivar las células de *E. coli*.



Una de las principales desventajas de las NP de Cu es que tienden a aglomerarse, disminuyendo considerablemente su área de contacto, lo cual disminuye considerablemente su actividad antimicrobiana. Ello explica la correlación que existe entre el tamaño de las NPs con su potencial bactericida; por ejemplo, las nanopartículas con un tamaño mayor a los 100 nm tienen una marginal actividad antimicrobiana (Allaker y Memarzadeh, 2014). Para contrarrestar esto, las NP pueden ser soportadas sobre un sustrato, e.g., zeolitas. Actualmente, existen estudios que demuestran la eficiencia en el uso de zeolitas modificadas en superficie con NPs de Cu para inactivar virus, como el H5N1 y el H5N3 (Bright *et al.*, 2009; Alswat *et al.*, 2017; Imai *et al.*, 2012).

Nanopartículas de Ag

La plata ha sido ampliamente utilizada como desinfectante debido a sus propiedades antimicrobianas. En especial, las NPs de Ag se han comercializado para este fin, logrando resultados eficientes para inhibir el crecimiento de bacterias, tales como *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus* y *S. epidermidis* (Li *et al.*, 2017). Inclusive, se ha evaluado la propiedad antimicrobiana de iones Ag⁺, siendo los resultados muy similares a los obtenidos para las NPs de Ag. Li *et al.* (2017), por ejemplo, evaluaron la actividad bactericida de los iones Ag⁺ en comparación con las NPs del mismo metal, observando que las bacterias *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus* y *S. epidermidis* (a una concentración inicial de 1×10^6 unidades formadoras de colonias por mililitro, UFC/mL) fueron mayormente inactivadas tras 5 h en contacto con una solución de 2 µg/mL de iones Ag⁺. Con base en resultados como los de este estudio, se plantea la posibilidad de soportar los iones Ag⁺ sobre un sustrato inerte como las zeolitas, para eliminar virus y bacterias de la misma manera que en el caso del Cu.

Fotocatálisis heterogénea para la desinfección

El proceso de fotocatálisis heterogénea se ha utilizado ampliamente para el tratamiento de aguas residuales industriales que contienen contaminantes recalcitrantes y emergentes. Este proceso se basa en el poder oxidante que tiene el radical •OH, permitiendo oxidar una amplia gama de sustancias orgánicas. En el contexto de propiedades antimicrobianas y viricidas, la fotocatálisis heterogénea se ha utilizado de manera tal que los radicales •OH degraden las membranas celulares de los microrganismos. Los materiales semiconductores nanoestructurados, como SiO₂, Ag₂O, Cu₂O, CeO₂ y NiO, entre otros, han sido utilizados con alta eficiencia para generar los radicales •OH (Hou *et al.*, 2018). Además de los radicales •OH, el proceso de fotocatálisis también permite generar otras especies reactivas de oxígeno, como el radical superóxido (•O₂⁻) o el peróxido de hidrógeno. Por ejemplo, en el estudio de Hou *et al.* (2018) se presentan datos sobre la inhibición del crecimiento de *S. aureus* empleando materiales heteroestructurados SiO₂/Ag₂O y SiO₂/Cu₂O, encontrando la total inhibición bacteriana tras una hora de irradiación con luz visible.



En cambio, los mismos resultados se obtuvieron con $\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ y SiO_2/NiO pero en un tiempo de 24 horas. No obstante, es importante determinar el aspecto económico para determinar el material que se empleará en el sistema photocatalítico, bajo la consideración de aspectos tales como la vida útil, estabilidad e inocuidad, entre otros. De esa manera, se llegaría a proponer un material photocatalítico de mayor eficiencia. Así, con el objetivo de obtener las NPs de manera económica, se deberían seleccionar las NPs de Cu en lugar de la Ag, aunque estas últimas sean más eficientes.

El material semiconductor TiO_2 es el mayormente utilizado en los ensayos de photocatálisis heterogénea, debido a su elevada capacidad para generar radicales $\cdot\text{OH}$ y $\cdot\text{O}_2^-$ (Ouay y Stellacci, 2015). Además de sus propiedades photocatalíticas, el uso del TiO_2 se ha extendido debido a su inocuidad para el ser humano y para el medio ambiente. No obstante, para evitar la recombinación de los pares electrón-hueco en el semiconductor, así como lograr su activación bajo irradiación visible, se suele modificar el TiO_2 formando materiales heteroestructurados. Con este fin, se han realizado diversos estudios para generar materiales compositos de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$, empleando para ello el método sol-gel y el método hidrotermal para formar el TiO_2 . Posteriormente, utilizando alguna sal de Ag y un agente reductor, se lleva a cabo la reducción de los iones Ag^+ , los cuales primero co-precipitan sobre las NPs de TiO_2 . En otros métodos, se ha llevado a cabo la formación simultánea de las NPs de Ag y TiO_2 , a través del método sol-gel seguido de tratamiento térmico. Esta variante también incluye el uso de un agente reductor, como el ácido ascórbico, la glucosa, el borohidruro de sodio o el citrato de sodio (Kedziora *et al.*, 2012). Otro método utilizado es la formación de las NPs de Ag mediante foto-reducción de iones Ag^+ utilizando luz UV de alta energía (Skorb *et al.*, 2008).

Nanopartículas soportadas sobre zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos porosos, los cuales presentan poros menores a los 2 nm. Su estructura está conformada por tetraedros de silicio y aluminio, lo cual propicia un exceso de carga negativa; en específico, en los tetraedros de aluminio. Este exceso de carga negativa suele ser compensado con iones Na^+ , K^+ , Ca_{+2} y Mg^{+2} , principalmente, permitiendo que otros iones se intercambien con los iones presentes originalmente en la zeolita. Esta propiedad de intercambio iónico hace que las zeolitas puedan ser modificadas con otros cationes. Aunque los iones de intercambio presentes en las zeolitas no son propiamente NPs, se utiliza su tamaño y accesibilidad para diversas aplicaciones. En este caso, se utiliza el método de intercambio iónico para modificar las zeolitas con iones Cu^{+2} , Ag^+ , entre otros con propiedades antimicrobianas. Los ensayos de photocatálisis heterogénea para inactivar bacterias y virus normalmente emplean zeolitas comerciales, aunque otras zeolitas sintetizadas con precursores no convencionales también se han propuesto como una alternativa para disminuir posibles impactos ambientales asociados con el uso de

las zeolitas comerciales (Espejel-Ayala *et al.*, 2014; Espejel-Ayala y Ramírez-Zamora, 2015; Sánchez-Ruiz *et al.*, 2018; Coutino-González *et al.*, 2018; Lázaro *et al.*, 2020). Asimismo, se ha propuesto el uso de zeolitas naturales como materiales antimicrobianos. Sobre estos estudios, Copcia *et al.*, (2011) realizaron la evaluación de las propiedades antimicrobianas de zeolita natural, del tipo clinoptilolita, intercambiada con iones Ag^+ . La capacidad de la zeolita natural se probó para inhibir las bacterias *S. aureus* y *E. coli*, obteniendo resultados favorables con una dosis de 2 mg/mL en un tiempo de 24 horas y una temperatura de 37 °C. Para estos ensayos, la clinoptilolita fue tratada con ácido e intercambiada primero con iones Na^+ , siendo 86.3% el máximo grado de intercambio de los iones Na^+ por los de Ag^+ . Una de las mayores desventajas de utilizar zeolitas naturales en pruebas de actividad fotocatalítica es la presencia de impurezas en el mineral, tales como cuarzo, otros silicatos y óxidos de hierro. Estas impurezas pueden bloquear los poros de las zeolitas, impidiendo que el intercambio iónico se lleve de manera que permita que la mayoría de los sitios de intercambio en la zeolita sean accesibles a los iones. En el caso particular de la clinoptilolita, esta presenta un diámetro de poro menor al de las zeolitas comerciales, como la zeolita A, lo cual dificulta el intercambio iónico.

Bright *et al.* (2009) realizaron un estudio en el cual modificaron la superficie de una zeolita natural con NPs de Ag, Cu y ZnO. La zeolita modificada se puso en contacto con el coronavirus humano 229E y el calcivirus felino F-9. Los resultados demostraron la efectividad de las NPs soportadas en la zeolita para inactivar los virus. La zeolita modificada con NPs de Ag interactúa con las terminales sulfhidrilo de las proteínas que conforman las cápsides virales, ocasionando una interrupción en la replicación del virus. Los autores sugirieron que la inactivación de los virus se llevó a cabo mediante el bloqueo de los receptores en las células de los hospederos o por la interrupción en la replicación del material genético viral dentro de la célula hospedera. En el caso del Cu, este bloquea los grupos funcionales en las proteínas de las cápsides virales, además de inactivar las enzimas que llevan a la liberación del material genético del virus mediante la generación de las ERO. En el caso de las NPs de ZnO, estas producen H_2O_2 , el cual puede inactivar las partículas virales. La cantidad de los elementos en la zeolita, suficiente para inactivar los virus, ha sido determinada entre 0.6 y 3.5% de Ag, 3.5 a 20% para Cu y hasta un 80% en el caso del ZnO. El coronavirus humano 229E y el calcivirus felino F-9 fueron inactivados, en una mayor proporción, a las 24 h de contacto con la zeolita que contenía 3.5% de Ag y 6.5% de Cu. Con esto quedó demostrada la eficacia de la zeolita modificada con las nanopartículas de Ag y Cu, y, en menor medida, con ZnO.

Imai *et al.* (2012) demostraron la inactivación de los virus H5N1 y H5N3 utilizando NPs de Cu soportadas sobre zeolita y estas, a su vez, colocadas en una fibra textil. La zeolita fue modificada con Cu mediante intercambio iónico. El máximo grado de inactivación se alcanzó tras 10 minutos de exposición, con la disminución de hasta 6 unidades logarítmicas (\log_{10}) en la concentración del virus H5N1. Alswat *et al.*, (2017) realizaron la modificación de

zeolita A con NPs de CuO, promoviendo el intercambio de los iones de Na^+ por los de Cu^{2+} a través del proceso de coprecipitación, lo cual resultó en la formación de NPs de CuO de 30 nm. La concentración de 8%, en peso, de las NPs de CuO fue suficiente para alcanzar una alta tasa de inhibición de *Bacillus subtilis* y *Salmonella choleraesuis*. Los autores determinaron que si la carga de NPs de CuO aumentaba hasta un 10% (w/w), la eficiencia de inhibición disminuía en virtud de la aglomeración de las partículas, disminuyendo el contacto entre las células bacterianas y la zeolita activada.

Recubrimientos fotocatalíticos

A diferencia del uso de sustancias sanitizantes y desinfectantes que tienen que ser esparcidas continuamente sobre las superficies expuestas a virus y bacterias, las superficies pueden cubrirse con algún agente que muestre una alta persistencia. Estudios previos han propuesto la formación de un recubrimiento electroquímico de NPs de Ag, Cu y ZnO (Reyes-Vidal *et al.*, 2015; Shut y Mozzharov, 2017; Jose *et al.*, 2018). No obstante lo eficiente del método electroquímico, este se limita a su aplicación sobre superficies metálicas, limitado por la conducción eléctrica de las superficies. Otro tipo de superficies, como el concreto y otras estructuras quedan expuestas a virus y bacterias que pueden mantenerse activos por horas o incluso días. Es claro que las superficies de hospitales pueden contener una cantidad significativa de virus y bacterias y estos ser transportados a otros lugares a través de vectores, como las suelas de zapatos. En este caso, se propone el uso de algún recubrimiento que contenga a las NPs con propiedades antimicrobianas. Este enfoque ha sido previamente utilizado para la degradación de contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, procurando que las NPs queden expuestas a la luz solar, al oxígeno (aire) y a la humedad del ambiente (H_2O), de lo contrario la eficiencia se vería disminuida o anulada (Ramsden, 2015).

Azizi-Lalabadi *et al.* (2019) realizaron la síntesis de zeolita A, impregnada con NPs de TiO_2 , ZnO y el composito TiO_2/ZnO . La zeolita modificada fue evaluada como material antimicrobiano, exponiéndolo a *S. aureus*, *P. fluorescens*, *L. motocytogenes* y *E. coli* O157:H7. Los autores de este trabajo propusieron el uso de la zeolita A modificada con las NPs para recubrir empaques de alimentos. La zeolita A impregnada con TiO_2/ZnO presentó la mayor eficiencia, con una dosis en promedio de 2.5 mg/mL, en comparación con las dosis requeridas para la zeolita A impregnada con TiO_2 y ZnO por separado: 3.25 y 3.0 mg/mL, respectivamente. No obstante, esta diferencia no resultó ser significativa (valor $p = 2.44$).

El uso de zeolita A modificada con NPs del composito TiO_2/Ag se ha propuesto como un componente de recubrimiento de látex poliacrílico con propiedades fotocatalíticas antimicrobianas (Nosrati *et al.*, 2015). Los mejores resultados obtenidos fueron al soportar cargas de zeolita de 0.5 y 1% (w/w)

sobre la resina acrílica, en comparación con la resina sin zeolita, empleando tanto luz UV como luz visible para foto-activar al composite. El uso de NPs de TiO₂ en recubrimientos fotocatalíticos antimicrobianos ha sido propuesto con la consideración de que el tamaño de las NPs debe ser de hasta 10 nm (Anpo *et al.*, 1987; Jang y Kim, 2001). Con esto, se aumenta la generación de las ERO que permiten la eliminación de los microrganismos, además de otros contaminantes que pudieran estar presentes en el ambiente.

Hochmannova y Vytrasova (2010) realizaron una serie de formulaciones de recubrimientos fotocatalíticos antimicrobianos, empleando NPs de TiO₂ y ZnO en concentraciones de 5 y 7% en peso, respectivamente. Las pruebas fotocatalíticas fueron realizadas para alcanzar la inactivación de *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *Aspergillus niger* y *Pseudomonas chrysogenum*. Cabe señalar que los recubrimientos fotocatalíticos fueron formulados para ser usados en paredes interiores de casa habitación, evaluando su desempeño tras ser irradiados con una lámpara fluorescente doméstica. Los resultados permitieron constatar la eficiencia de las NPs de ZnO, en una carga de 1.5% para inhibir el crecimiento de los microrganismos. Más aún, los resultados obtenidos con las NPs de ZnO fueron mejores que con el uso de NPs de TiO₂ en fase anatasa. Zucheri *et al.* (2013) también realizaron formulaciones de un recubrimiento fotocatalítico antimicrobiano, empleando NPs de TiO₂, las cuales fueron eficientes para inactivar las bacterias *E. coli*, *S. aureus* y *P. aeruginosa*. La concentración óptima de las NPs de TiO₂ fue de 2% en volumen para el recubrimiento base acrílico transparente, denominado resina/Aeroxide® TiO₂ P25. También se demostró la adherencia de las NPs aplicando el recubrimiento sobre piezas de madera. Estas piezas impregnadas fueron puestas en contacto con 2.5 mL del cultivo de microrganismos (Co = 1x10⁸ UFC/mL). El porcentaje de células viables después de 24 h de contacto con el recubrimiento fotocatalítico fue de 23.2%, 4.6% y 1.7% para *E. coli*, *P. aeruginosa* y *S. aureus*, respectivamente. Es importante determinar la formulación del recubrimiento fotocatalítico, con el objetivo de optimizar tanto el proceso de elaboración, así como su efectividad, pues el recubrimiento debería poderse aplicar en diversos tipos de superficies, ser duradero y no tóxico. Este enfoque podría ser una opción preventiva para disminuir los casos de contagio de la enfermedad COVID-19. No obstante, se deben realizar estudios con el virus SARS-CoV-2, considerando sus distintas variantes. Aunado a esto, se sigue sugiriendo llevar a cabo todas las medidas de prevención implementadas por el gobierno. Más aún, pueden venir otros tipos de virus aún más letales, aunque para ello, la nanotecnología ofrece una serie de acciones y estrategias para luchar en contra de estos enemigos invisibles para el ser humano.

Conclusiones

Se presentaron diversos trabajos en los cuales se utilizaron NPs de Ag, Cu, ZnO y TiO₂, y recubrimientos con estas NPs, que demuestran su actividad

fotocatalítica y antimicrobiana. Las NPs fueron evaluadas para inhibir el crecimiento de bacterias que causan diversas enfermedades. Además, esta aplicación puede extrapolarse para usar las NPs y los recubrimientos fotocatalíticos para inactivar virus como el SARS-CoV-2. Esto permitiría tener superficies con un recubrimiento autolimpiable, cuyas aplicaciones podrían extenderse a superficies tales como pisos, aceras, escaleras y barandales, entre otros, que son áreas comunes en hospitales y los cuales llegan a concentrar cantidades significativas de virus y bacterias. No obstante su aplicación, se debe cuidar que la cantidad (o tipo de luz) irradiada, la concentración de oxígeno moléculas y la humedad en el ambiente sean adecuadas para que los recubrimientos sean altamente eficientes en la degradación de contaminantes y patógenos.

Referencias

Allaker, R. P., Memarzadeh K. (2014). Nanoparticles and the control of oral infections. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 43: 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2013.11.002>

Alswat, A. A., Bin Ahmad M., Hussein M. Z., Ibrahim N. A., Saleh T. A. (2017). Copper oxide nanoparticles-loaded zeolite and its characteristics and antibacterial activities. *Journal of Materials Science and Technology*, 33: 880-896. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.03.015>

Anpo, M., Shima T., Kodama S., Kubokawa Y. (1987). Photocatalytic hydrogenation of propyne with water on small-particle titania: size quantization effects and reaction intermediates. *The Journal of Physical Chemistry*, 91(16): 4305-4310. <https://doi.org/10.1021/j100300a021>

Auchynnikava, A. A., Vorobyova A., Rzheussky S. E. (2015). Antimicrobial activity of copper nanoparticles depending on the particles size. En *Physics, chemistry and application of nanostructures*, 480-483. https://doi.org/10.1142/9789814696524_0118

Azizi-Lalabadi, M., Ehsani A., Divband B., Alizadeh-Sani M. (2019). Antimicrobial activity of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles supported in 4A zeolite and evaluation the morphological characteristic. *Scientific Reports*, 9: 17439. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54025-0>

Bleichert, P., Espírito Santo Ch., Hanczaruk M., Meyer H., Grass G. (2014). Inactivation of bacterial and viral biothreat agents on metallic copper surfaces. *Biometals*, 27: 1179-1189. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9781-0>

Bright, K. R., Sicairos-Ruelas E. E., Gundy P. M., Gerba Ch. P. (2009). Assessment of the antiviral properties of zeolites containing metals ions. *Food Environmental Virology*, 1: 37-41. <https://doi.org/10.1007/s12560-008-9006-1>

Chatterjee, A. K., Chakraborty R., Basu T. (2014). Mechanism of antibacterial activity of copper nanoparticles. *Nanotechnology*, 25: 135101. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/13/135101>

Chuang, K-T., Abdullah H., Leu S-J., Cheng K-B., Kuo D-H., Chen H-Ch., Chien J-H., Hu W-T. (2017). Metal oxide composite thin films made by magnetron sputter-

ing for bactericidal application. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 337, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.01.012>

Copcia, V. E., Luchian C., Dunca S., Bilba N., Hristodor C. M. (2011). Antibacterial activity of silver-modified natural clinoptilolite. *Journal of Materials Science*, 46: 7121-7128. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5635-0>

Coutino-González, E., Manríquez J., Robles I., Espejel-Ayala F. (2018). Synthesis of MCM-41 material from acid mud generated in the aluminum extraction of kaolinite mineral. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38: 13069. <https://doi.org/10.1002/ep.13069>

Espejel-Ayala, F., Corella R. C., Pérez A. M., Pérez-Ramírez R., Ramírez-Zamora R. M. (2014). Carbon dioxide capture utilizing zeolites synthesized with paper sludge and scrap-glass. *Waste Management*, 32: 1219-1226. <https://doi.org/10.1177/0734242X14554643>

Espejel-Ayala, F., Ramírez-Zamora R. M. (2015). Optimization of the synthesis process of zeolites with high cation Exchange capacity using copper in mine tailings as raw material. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37: 996-1002. <https://doi.org/10.1002/ep.12766>

Grass, G., Rensing Ch., Solioz M. (2011). Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and Environmental Microbiology*, 77: 1541-1547. <https://doi.org/10.1128/AEM.02766-10>

Green, J. J. (2014). Antimicrobial copper alloys-group I and associated fabricated products. EPA Reg. No. 82012-1.

Hans, M., Mathews S., Mucklich F., Solioz M. (2016). Physicochemical properties of copper important for its antibacterial activity and development of a unified model. *Biointerphases*, 11: 018902. <https://doi.org/10.1116/1.4935853>

Hochmannova L., Vytrasova J. (2010). Photocatalytic and antimicrobial effects of interior paints. *Progress in Organic Coatings*, 67: 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.09.016>

Hou, Y-X., Abdullah H., Kuo D-H., Leu S-J., Gultom N. S., Su Ch-H. (2018). A comparison study of SiO₂/nano metal oxide composite sphere for antibacterial application. *Composites*, 133(15): 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.021>

Imai, K., Ogawa H., Bui V. N., Inoue H., Fukuda J., Ohba M., Yamamoto Y., Nakamura K. (2012). Inactivation of high and low pathogenic avian influenza virus H5 subtypes by copper ions incorporated in zeolite-textile materials. *Antiviral Research*, 93: 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2011.11.017>

Jang, H. D., Kim S. K. (2001). Controlled synthesis of titanium dioxide nanoparticles in a modified diffusion flame. *Materials Research Bulletin*, 36(3-4): 627-637. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(01\)00552-9](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(01)00552-9)

Jose, A., Devi K. R. S., Pinhero D., Narayana L. (2018). Electrochemical synthesis, photodegradation and antibacterial properties of PEG capped zinc oxide nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 187: 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.07.022>

Kedziora, A., Trek W., Kepinski L., Bugla-Płoskowska G., Doroszkiewicz W. (2012). Synthesis and antibacterial activity of novel titanium dioxide doped with silver.

Journal of Sol-Gel Science and Technology, 62: 79-86. <https://doi.org/10.1007/s10971-012-2688-8>

Konieczny, J., Rdzawski Z. (2012). Antibacterial properties of copper and its alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 56(2): 53-60.

Lázaro, A. L., Rodríguez-Valadez F., Machorro-López J. J., Espejel-Ayala F. (2020). SBA-15 synthesis from sodium silicate prepared with sand and sodium hydroxide. *Materials Research Express*, 7: 045503. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab83a5>

Li, W-R., Sun T-S., Zhou Sh-L., Ma Y-K., Shi Q-Sh., Xie X-B., Huang X-M. (2017). A comparative analysis of antibacterial activity, dynamics, and effects of silver ions and silver nanoparticles against bacterial strains. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 123: 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.015>

Luo, J., Hein Ch., Mucklich F., Solioz M. (2017). Killing of bacteria by copper, cadmium and silver surfaces reveals relevant physicochemical parameters. *Bioinertphases*, 12(2): 020301. <https://doi.org/10.1116/1.4980127>

Malato, S., Maldonado M. I., Fernández-Ibañez P., Oller I., Polo I., Sánchez-Moreno R. (2016). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: the pilot plants of the plataforma solar de Almería. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42: 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.017>

Nosrati, R., Olad A., Nofouzi K. (2015). A self-cleaning coating based on commercial grade polyacrylic latex modified by TiO₂/Ag-exchanged-zeolite A nanocomposite. *Applied Surface Science*, 346: 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.056>

Ouay, L., Stellacci F. (2015). Antibacterial activity of silver nanoparticles: a surface science insight. *Nano Today*, 10: 339-354. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.002>

Ramsden, J. J. (2015). Photocatalytic antimicrobial coatings. *Nanotechnology Perceptions*, 11: 146-168. <https://doi.org/10.4024/N12RA15A.ntp.15.03>

Reyes-Vidal, Y., Suárez-Rojas R., Ruiz C., Torres J., Talu S., Méndez A., Trejo G. (2015). Electrodeposition, characterization, and antibacterial activity of zinc/silver particle composite coatings. *Applied Surface Science*. 342(1): 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.037>

Sánchez-Ruiz, A., Robles-Gutiérrez I., Espejel-Ayala F. (2018). Preparation of zeolitic material using natural clinoptilolite for CO₂ capture. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17: 573-585. <https://doi.org/10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Sanchez>

Shut, V. N., Mozzharov S. E. (2017). Properties of ultrafine copper-containing powders prepared by a sonochemical method. *Inorganic Materials*, 53: 883-889. <https://doi.org/10.1134/S0020168517080155>

Skorb, E. V., Antonouskaya L. I., Belyasova N. A., Shchukin D. G., Mohwald H., Sviridov D. V. (2008). Antibacterial activity of thin-film photocatalysts based on metal-modified TiO₂ and TiO₂:In₂O₃ nanocomposite. *Applied Catalysis B*, 84: 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.03.007>

Wu, Z-Y., Abdullah H., Ku D. (2018). Photocatalytic antibacterial activity of copper-based nanoparticles under visible light illumination. *Journal of Physics: Conference Series*, 1007.012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1007/1/012062>

Zakharova, O. V., Godymchuk A. Y., Gusev A. A., Gulchenko S. I., Vasyukova I. A., Kuznetsov D.V. (2015). Considerable variation of antibacterial activity of Cu nanoparticles suspensions depending on the storage time, dispersive medium, and particles sizes. *Biomedical Research International*, 2015: 41530. <https://doi.org/10.1155/2015/412530>

Zuccheri, T., Colonna M., Stefanini I., Santini C., Di Gioia D. (2013). Bactericidal activity of aqueous acrylic paint dispersion for wooden substrates based on TiO₂ nanoparticles activated by fluorescent light. *Materials*, 6(8): 3270-3283. <https://doi.org/10.3390/ma608327>