

nanopartículas al acecho

Mariana Herrera-Rodríguez, Carmen Ximena Martínez Escutia, Estefany I. Medina-Reyes, Yolanda I. Chirino

Del agua a tu cuerpo:



Introducción

El agua, es el recurso más necesario para el desarrollo de la humanidad e indispensable para su supervivencia. El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene representan la necesidad humana más básica para el cuidado de la salud y el bienestar, por lo que inclusive se considera como derecho (Naciones Unidas, 2023).

Actualmente existe una gran preocupación por la escasez del agua a nivel mundial, producto del sobreuso por el ser humano y del cambio climático. Además, la humanidad no sólo se enfrenta a esta problemática, sino también a la contaminación del agua, que va de la mano con la degradación de los ecosistemas que proveen a los humanos de agua potable, como algunos humedales, que retienen y almacenan el agua.

La **contaminación del agua** ocurre por distintas sustancias que resultan dañinas para el ambiente y que llegan a los distintos cuerpos de agua (como los ríos, lagos, humedales y mares). De acuerdo con las Naciones Unidas, se considera como **agua contaminada** a aquella que tiene alterada su composición de forma directa o indirecta por la actividad humana. Existen distintas fuentes de contaminación y distintos productos que llegan al agua.

Para ti... ¿Qué es lo que contamina el agua?

- Bacterias y virus
- Jabón y shampoo
- Gasolina
- Materia orgánica (alimentos, heces)
- Medicamentos y drogas ilícitas
- Parásitos
- Pesticidas o plaguicidas
- Plásticos

Quizá los elementos de la lista anterior te resulten muy conocidos, sin embargo, existen otros contaminantes del agua que no vemos y en los cuales es necesario poner atención.

Contaminación del agua por nanopartículas

Dentro de los contaminantes del agua podemos encontrar a las nanopartículas (NPs), las cuales se producen de diferentes materiales, y se caracterizan por tener un tamaño de entre 1 a 100 nanómetros, es decir, un tamaño tan pequeño como un virus. Estas NPs se pueden considerar como un arma de doble filo, ya que por un lado tienen efectos muy benéficos, por ejemplo, hacer los aparatos electrónicos (celulares y computadoras) más ligeros, o hacer que los medicamentos lleguen a un tumor, o incluso se usan en componentes de cohetes espaciales, barcos o vehículos. Sin embargo, después del uso de estas NPs, se convierten en desechos que contaminan el ambiente y con ello, el agua.

Las NPs que encontramos en algunos medicamentos, cosméticos, ropa e inclusive en alimentos procesados, pueden llegar al agua principalmente por los desechos de la industria y de los productos que las contienen en las aguas residuales domésticas (Figura 1A), las cuales usualmente terminan en el mar, afectando así a la fauna marina como al atún, cangrejo, camarones, etc., y a otros muchos organismos (Yin *et al.*, 2017), que terminan teniendo un efecto negativo en los ecosistemas.

Por lo anterior, la presencia de NPs ha generado preocupaciones sobre la ecotoxicidad de las NPs (Figura 1B), que se refiere a los efectos dañinos en los ecosistemas y en los organismos biológicos que los habitan. Y es que algunas de

estas NPs, como las de dióxido de titanio (TiO₂) que son altamente producidas y usadas en la nanotecnología, incrementan el daño provocado en los organismos marinos por la acidificación del agua que es generada por contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) (Xia *et al.*, 2018). A pesar de este efecto, las NPs se pueden usar como método de remediación y saneamiento del agua.

Remediación con nanopartículas: una ventaja con riesgos

La **remediación del agua** es el proceso para limpiar el agua contaminada, ya sea reduciendo o eliminando algunos agentes dañinos para el ser humano y/o el ambiente; y el **saneamiento del agua** se refiere al conjunto de procedimientos realizados para asegurar que el agua es apta para el consumo humano. Para ello, existen muchas técnicas y una de ellas consiste en el tratamiento con NPs ya que, debido a su tamaño diminuto, poseen propiedades únicas que pueden ser aprovechadas para eliminar contaminantes presentes en aguas residuales (Figura 1C).

Uno de sus mecanismos es servir como imanes de compuestos contaminantes, como el arsénico, y así eliminar contaminantes de forma más eficiente que otros métodos empleados en las plantas de tratamiento del agua. Algunas otras NPs, como las del óxido de zinc (ZnO), pueden ayudar a que los organismos marinos, como los moluscos, sobrevivan ante la acidificación del agua (Huang *et al.*, 2018). Otras inclusive, como las de TiO₂, pueden servir para reducir la presencia de bacterias incluso si la concentración de estas es baja (Farkas *et al.*, 2015), y pueden usar la luz solar para eliminar este tipo de contaminantes y otros (Awfta *et al.*, 2018).

Entre las ventajas, encontramos que las NPs son altamente eficientes en comparación con otros métodos convencionales, como el uso del ozono o el cloro, con los cuales muchos compuestos persisten sin alteración alguna. También, pueden ser diseñadas para tratar contaminantes específicos, y requieren poco espacio si las comparamos con otros métodos. Sin embargo, como en la mayoría de los procesos de tratamientos de aguas residuales, su empleo no es del todo satisfactorio, ya que algunos compuestos persisten sin alteración alguna y parte de éstas NPs persisten en el agua tratada (Figura 1D). Por esto se cuestiona mucho el empleo de la nanotecnología en el tratamiento del agua, porque, pueden tener efectos tóxicos para los organismos que no se buscan eliminar o para la salud humana si no se manejan adecuadamente, por lo que es necesario analizar y diseñar métodos para la recuperación de las NPs, así como considerar su posible toxicidad, para minimizar su afectación en el saneamiento del agua.

La presencia de NPs en el agua tratada, implica un riesgo porque puede usarse para los sembradíos de distintos vegetales y fruta del consumo humano (Figura 1E), y es en este escenario en donde las NPs se vuelven un arma de doble filo ya que podrían tener algunos efectos en la salud humana al ser un contaminante más del agua.

Para empezar, ¿Qué sucede cuando consumes agua contaminada?

El consumo de agua contaminada ya sea por virus, bacterias u otros microorganismos, implica la posibilidad de enfermarse por diarrea, o de padecer enfermedades más delicadas como la provocada por el virus del cólera o de la hepatitis, que incluso pueden provocar la muerte. Sin

embargo, las enfermedades generadas por la presencia de las NPs en el agua, no se han descrito y el riesgo que podrían tener para la salud aún no se ha evaluado del todo. A pesar de esto, se sabe que las NPs pueden afectar la estabilidad de las células del cuerpo humano tras su consumo ya sea por alimentos procesados o aquellas contenidas en animales del mar. Así que vamos a explorar dentro de las células.

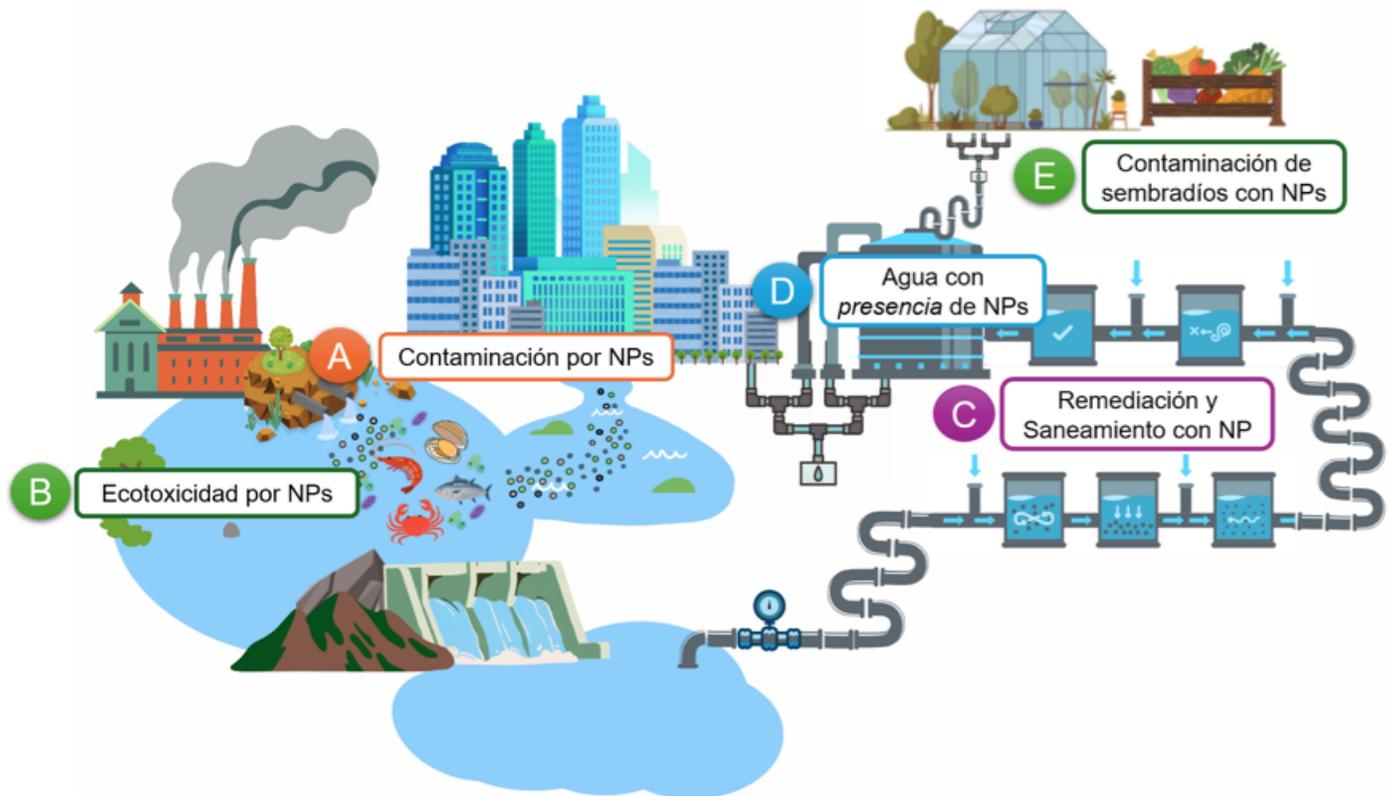


Figura 1. Ciclo de contaminación del agua por Nanopartículas (NPs). Existen diversas fuentes de contaminación del agua por NPs como las generadas por los desechos urbanos y generados por las fábricas que terminan en las aguas residuales (A). Esta agua contaminada con NPs usualmente termina en los mares o cuerpos de agua causando ecotoxicidad, es decir, alteraciones en los ecosistemas (B). La mayoría del agua contaminada pasa por un proceso de remediación del agua, y en algunas plantas de agua tratada usan las NPs como método de remediación, lo cual es un arma de doble filo (C). Esta agua tratada, que tiene presencia de NPs (D), llega a usarse en algunos lugares de las ciudades y también en el campo para el riego de sembradíos (E), continuando así con el ciclo de contaminación con NPs.

De tu boca a tus células

Las NPs entran a nuestro cuerpo por vía oral, es decir, por nuestra boca (Figura 2A); posteriormente llegan al estómago, donde el alimento se procesa para ser aprovechado en forma de energía y nutrientes. Sin embargo, un pequeño detalle, la mayoría de las NPs no se metabolizan, pasan

directo de nuestro intestino a nuestra sangre (Figura 2B), circulan por el torrente sanguíneo y posteriormente llegan y se depositan en otros órganos (Figura 2C), sin ninguna modificación importante en su estructura.

Las NPs tienen características físicas y químicas muy particulares, el tamaño tan pequeño es una de las más relevantes, por lo que logran entrar a las células con mucha facilidad. Existen diferentes mecanismos para ello, uno de los más comunes es la endocitosis, que ocurre cuando la membrana celular envuelve a las NPs formando algo como una canasta (endosoma), lo que permite su entrada. Otro mecanismo es la difusión pasiva, es decir que las NPs entran libremente, tal y como cuando cruzas tú una puerta, sin ayuda de nadie (Figura 2D), y este método es usado por las NPs de menor tamaño. Una vez dentro de las células, las NPs pueden permanecer dentro de ella por un tiempo indefinido y ocasionar distintos efectos nocivos. Por tanto, si el consumo de las NPs es muy continuo, logran acumularse en la célula y afectan componentes celulares importantes como lo es el retículo endoplasmático (Figura 2E).

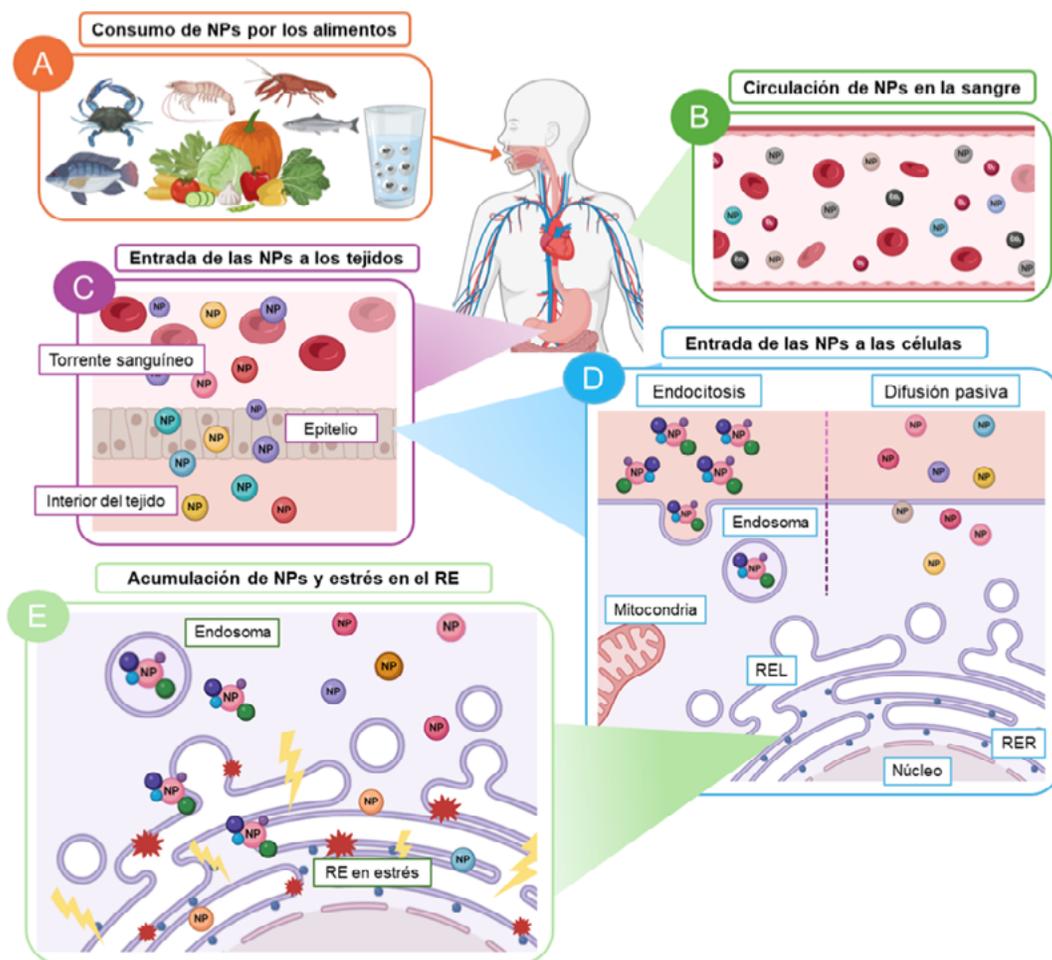


Figura 2. El camino que las nanopartículas contenidas en los alimentos recorren desde tu boca hasta las células de tu cuerpo. RE: Retículo endoplasmático, REL: Retículo endoplasmático liso, RER: Retículo endoplasmático rugoso.

¿Has escuchado hablar del retículo endoplasmático?

La célula se compone de varias estructuras internas con funciones específicas (organelo), entre ellos se encuentra la mitocondria, el núcleo, el aparato de Golgi, el retículo endoplasmático (RE) y otros. El RE es un organelo que se encuentra en las células eucariotas (animales, vegetales y hongos), que tiene una estructura membranosa; y entre sus principales funciones está la formación y transporte de proteínas, así como la regulación del calcio (Ca^{+2}) dentro de las células y la eliminación de compuestos dañinos dentro de la célula (Campbell y Farrell, 2021). Por tanto, si se daña el RE, se afectarían muchos procesos necesarios para el funcionamiento correcto de la célula.

El retículo endoplasmático en problemas

Cuando las condiciones celulares no son del todo óptimas, el RE puede sufrir estrés, el cual se conoce como estrés del retículo endoplasmático (ERE), tiene diversas consecuencias que afectan el funcionamiento de la célula. Dentro de las afectaciones más graves se encuentra el daño al material genético, la síntesis y función de las proteínas y por ende en el correcto funcionamiento correcto de la célula. A estas proteínas se les conoce como proteínas mal plegadas (proteínas que no se formaron correctamente) (Zhang *et al.*, 2015), y se ha observado que la acumulación de éstas se relaciona con múltiples enfermedades, entre las que destaca el Alzheimer y el Parkinson.

Las NPs de TiO_2 , de plata y muchas otras, pueden provocar ERE ya que aumentan la cantidad de calcio intracelular (Ca^{+2}) y de las especies reactivas de oxígeno (ROS) (He *et al.*, 2018). Al causar un grave ERE las proteínas no funcionan bien, derivando incluso en la muerte celular y en el desarrollo de patologías (Hackenberg *et al.*, 2011).

Aunque no hay evidencia que demuestre que el consumo de NPs sea la causa directa del desarrollo de enfermedades, sí hay evidencia de que pueden incrementar algunas como la colitis. Sin embargo, se sabe que el ERE (no necesariamente generado por las NPs) está relacionado con la posible adquisición de enfermedades gastrointestinales inflamatorias como la gastritis e incluso el cáncer de colon. Esto es importante, porque es entonces probable que el consumo de NPs, cause el ERE, y hacernos más propensos a desarrollar estas enfermedades.

En conclusión...

- Las NPs son sintetizadas por el ser humano utilizando diferentes materiales, y se usan en muchos productos de la vida cotidiana como los celulares, computadoras, ropa, alimentos, medicamentos, medios de transporte como autos, barcos e incluso en cohetes espaciales.
- Estas NPs forman parte de los desechos que son vertidos a los drenajes, siendo un contaminante más del agua.
- Estas NPs también se pueden usar en la remediación y saneamiento del agua, es decir, para limpiar el agua ya que se unen fácilmente materia orgánica y muchas moléculas que son parte de los contaminantes del agua.

- Aún no se sabe qué enfermedades podría causar el consumo de agua contaminada por NPs en el ser humano. Lo que sí se sabe, es que cuando estas NPs entran a las células humanas, pueden causar alteraciones en diferentes componentes celulares, entre ellos la mitocondria, el núcleo, el citoesqueleto y el retículo endoplásmico.
- El retículo endoplásmico (RE) es necesario para distintas funciones y permite la formación de proteínas, su transporte, y ayuda en la eliminación de compuestos dañinos dentro de la célula.
- Se sabe que las NPs pueden generar daño en el RE, y por lo mismo, es probable que esto aumente la posibilidad de desarrollar, o aumentar, enfermedades gastrointestinales como la gastritis, colitis o el cáncer de colon.

Mensaje final

Debemos ser responsables del consumo de productos que utilizamos en nuestra vida diaria considerando que todo lo que ponemos en el bote de basura puede contaminar el aire, el suelo, e incluso el agua, la cual reciclamos para su uso humano. Actualmente no hay legislación sobre el tipo y cantidad de NPs permitidas en las aguas tratadas, por lo que es necesario que se establezca un límite de uso o métodos de recuperación de las NPs por ser una posible fuente de contaminación en la que el ser humano esté expuesto y a largo plazo, causar daños a la salud. Además, es necesario tratar de usar artículos que sean durables y evitar aquellos de un solo uso para contribuir a reducir la contaminación ambiental.

REFERENCIAS

- Awfa, D., Ateia, M., Fujii, M., Johnson, M. S., y Yoshimura, C. (2018). Photodegradation of pharmaceuticals and personal care products in water treatment using carbonaceous-TiO₂ composites: A critical review of recent literature. *Water research*, 142, 26–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.036>
- Campbell M. y Farrell S. (2021). *Bioquímica*. 8a. edición. México: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V. ISBN: 978-1-285-42910-6
- Farkas, J., Peter, H., Ciesielski, T. M., Thomas, K. V., Sommaruga, R., Salvenmoser, W., Weyhenmeyer, G. A., Tranvik, L. J., y Jenssen, B. M. (2015). Impact of TiO₂ nanoparticles on freshwater bacteria from three Swedish lakes. *The Science of the total environment*, 535, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.043>
- Hackenberg, S., Scherzed, A., Kessler, M., Hummel, S., Technau, A., Froelich, K., Ginzkey, C., Koehler, C., Hagen, R., y Kleinsasser, N. (2011). Silver nanoparticles: evaluation of DNA damage, toxicity and functional impairment in human mesenchymal stem cells. *Toxicology letters*, 201(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2010.12.001>
- He, Q., Zhou, X., Liu, Y., Gou, W., Cui, J., Li, Z., Wu, Y., y Zuo, D. (2018). Titanium dioxide nanoparticles induce mouse hippocampal neuron apoptosis via oxidative stress- and calcium imbalance-mediated endoplasmic reticulum stress. *Environmental toxicology and pharmacology*, 63, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.08.003>
- Huang, X., Liu, Y., Liu, Z., Zhao, Z., Dupont, S., Wu, F., Huang, W., Chen, J., Hu, M., Lu, W., y Wang, Y. (2018). Impact of zinc oxide nanoparticles and ocean acidification on antioxidant responses of *Mytilus coruscus*. *Chemosphere*, 196, 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.183>
- Naciones Humanas. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Edición especial. Por un plan de rescate para las personas y el planeta. ISSN:2521-690
- Xia, B., Sui, Q., Sun, X., Han, Q., Chen, B., Zhu, L., y Qu, K. (2018). Ocean acidification increases the toxic effects of TiO₂ nanoparticles on the marine microalga *Chlorella vulgaris*. *Journal of hazardous materials*, 346, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.017>

Yin, C., Zhao, W., Liu, R., Liu, R., Wang, Z., Zhu, L., Chen, W., y Liu, S. (2017). TiO₂ particles in seafood and surimi products: Attention should be paid to their exposure and uptake through foods. *Chemosphere*, 188, 541-547. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.168>

Zhang, H., Wang, Z., Lu, X., Kong, X., Wu, F., Lin, L., Tan, X., Ye, L., y Xiao, J. (2015). Endoplasmic reticulum stress: relevance and therapeutics in central nervous system diseases. *Molecular neurobiology*, 51(3), 1343-1352. <https://doi.org/10.1007/s12035-014-8813-7>

Biol. Mariana Herrera Rodríguez, alumna del Programa de Doctorado en Ciencias Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuya línea de investigación es sobre contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud. Email: mhr270405@gmail.com

Biol. Carmen Ximena Martínez Escutia, bióloga egresada de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, cuyo proyecto de titulación se centró en la acumulación del aditivo alimentario dióxido de titanio en hígado, bazo y riñón. Email: ximesc1406@gmail.com

Dra. Estefany I. Medina-Reyes es bióloga con experiencia en toxicología, y su trabajo en los últimos 11 años se ha enfocado en mostrar los efectos adversos que diversos nanomateriales y aditivos alimentarios inducen en el sistema respiratorio y gastrointestinal. Email: medinaingrid0@gmail.com

Dra. Yolanda I. Chirino es una científica dedicada a identificar agentes que están presentes en áreas de trabajo, en el ambiente o en alimentos que pueden causar daños a la salud humana y agradece el apoyo otorgado al proyecto IN209522 por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (DGAPA-UNAM). Email: chirino@unam.mx

