



PROBLEMAS Y SOLUCIONES RELACIONADAS A LA TOXICIDAD DE LOS NANOMATERIALES.

PROBLEMS AND SOLUTIONS RELATED TO NANOMATERIALS TOXICITY.

Cruz-Gómez Jorge ^{1*}, Santos-Cruz, José ^{1*}, Mayén-Hernández Sandra Andrea ¹, De Moure-Flores Francisco ¹

¹ Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

* Autores de correspondencia, correo: jorge_jcg@icloud.com y jsantos@uaq.edu.mx

Resumen

Los nanomateriales y sus aplicaciones han tenido un rápido desarrollo científico. Este crecimiento acelerado está presente en un sinnúmero de productos comerciales utilizados en nuestra vida diaria; dichos artículos mejoran o hacen posibles beneficios impensables apenas diez años antes. Es innegable su utilidad en todas las áreas tecnológicas, tales como medicina, biología, energía, electrónica, cuidado personal, comunicaciones, e incluso en armas y explosivos. Por desgracia, este crecimiento no ha ido de la mano con el control de sus efectos contaminantes y tóxicos para los seres vivos y el ambiente. Este artículo se enfoca en la toxicidad de los nanomateriales y en los procedimientos para eliminar o disminuirla. No exhortamos a dejar de usar los nanomateriales; salvo en los casos donde el uso de estos sea peligroso para la salud. Es recomendable tomar las medidas de seguridad al sintetizar y utilizar estos materiales; así como avanzar en la investigación para obtener nano materiales más eficaces y seguros.

Palabras clave: *Nanomateriales, puntos cuánticos, re-
mediación, toxicidad*

Abstract

Nanomaterials have had a rapid scientific development. And its technological applications are following a similar behavior. This accelerated growth is present in a myriad of commercial products used in our daily lives; such items enhance or make possible benefits unthinkable just ten years earlier. Its usefulness in all technological areas is undeniable, such as medicine, biology, energy, electronics, personal care, communications, and even in weapons and explosives. Unfortunately, this growth has not gone hand in hand with controlling its polluting and toxic effects on living beings and the environment. This article focuses on the toxicity of nanomaterials and procedures for eliminating or decreasing that toxicity. We do not encourage you to stop using nanomaterials; except in cases where the use of these is dangerous to health. It is advisable to take safety measures when synthesizing and using these materials; as well as advancing research to obtain more effective and safe nanomaterials.

Keywords: *Nanomaterials, quantum dots, remediation, toxicity*

1. Introducción

Desde hace algunos años, inicios de la década de los noventa para ser precisos, se escucha hablar de nano materiales (Kruis y col., 1998:1). Se puede definir el término nano material, como aquel material en el cual una, dos o tres de sus dimensiones están por debajo de los cien nanómetros de longitud ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$); pudiendo hablar así de nano láminas, nano alambres y nanopartículas o un caso específico de ellas, los puntos cuánticos. Estos nano materiales (NM) tienen propiedades particulares que han permitido su aplicación en muy diversas áreas de la Ciencia y de la Tecnología. Tales aplicaciones incluyen, cosméticos, aditivos para combustibles y lubricantes, sensores biológicos y químicos, agroquímicos, detergentes, empaques y procesos de alimentos, absorbentes de radiación UV, materiales de construcción, armas y explosivos, y muchas aplicaciones más (Prajitha y col., 2019:2).

Ante tantas aplicaciones, la producción de NM se está incrementando (Lewinski y col., 2008:2). Y sus desechos empiezan a aparecer; es momento para cuestionarnos acerca de sus riesgos presentes y potenciales; y claro, trabajar para eliminar o reducir estos riesgos. Es esta la motivación para trabajar en el presente documento, utilizando fuentes fidedignas y actuales.

El desarrollo del documento inicia con la descripción de los nano materiales. Continúa con la presentación de sus riesgos, para proseguir considerando las soluciones presentes, en desarrollo y futuras, y finaliza con la conclusión respecto a la inquietud inicialmente planteada.

2. Descripción de los nano materiales

En la figura 1 se muestra la clasificación de los NM, acorde a la definición dada al inicio de este documento. Se conoce como NM 0D a aquellos que, en ninguna dirección tienen longitud mayor que 100 nm, como el caso de nanopartículas y puntos cuánticos. Además de NM 0D también existen NM 1D; los cuales tienen longitud mayor que 100 nm en una dirección, tales como nano alambres y nanotubos. Además, existen los NM 2D; aquellos cuya longitud es mayor que 100 nm en dos dimensiones, tales como nano láminas de grafeno. Y finalmente se conocen NM 3D; cuyas longitudes son mayores que 100 nm en sus tres dimensiones (Prajitha y col., 2019:2).

Otra clasificación de gran interés es considerar sus propiedades físicas y químicas. En esta los podemos integrar en seis grupos. Los primeros están constituidos de carbono; los materiales típicos son los fullerenos (materiales de forma esférica que contienen sesenta

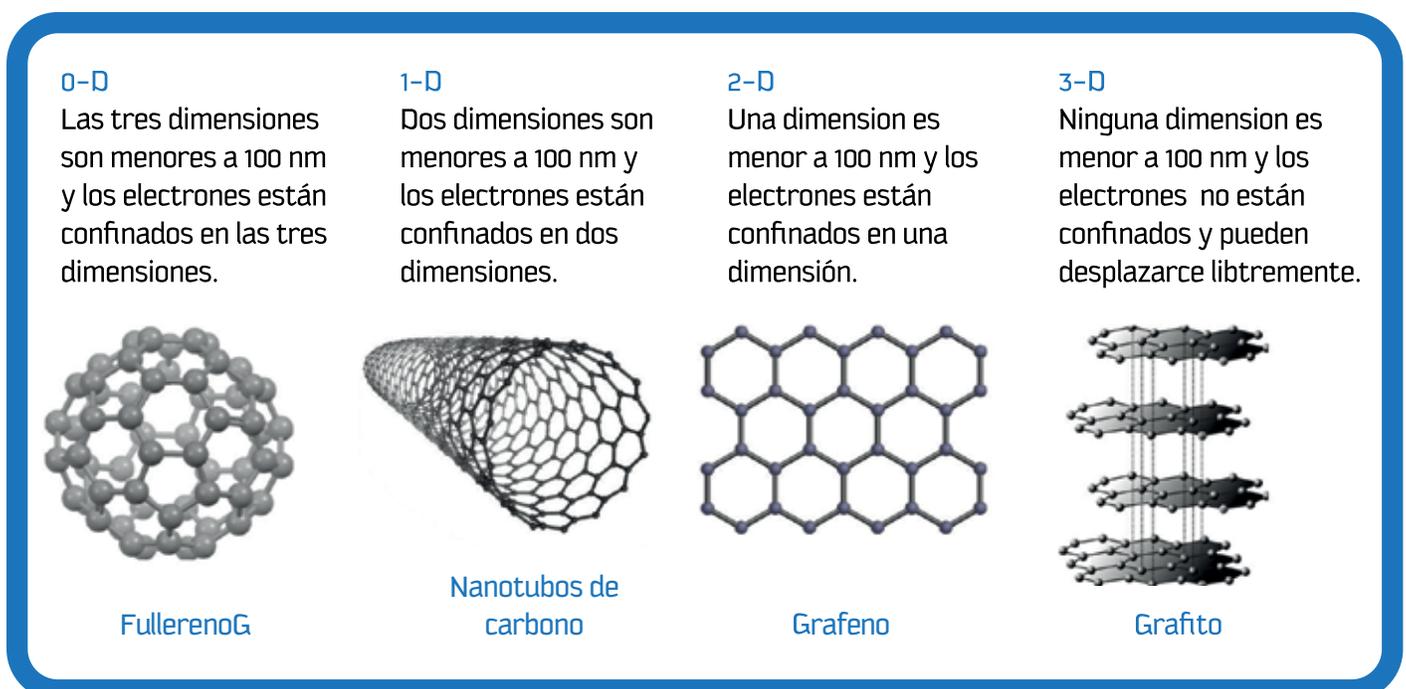


Figura 1. Clasificación de NM considerando su forma y tamaño (Amaya y Quiroga, 2019:10).

o setenta carbonos habitualmente). Otro grupo está constituido de NM metálicos, los ejemplos típicos son cobre, plata y oro. El tercer grupo lo forman los NM cerámicos que se sintetizan utilizando sólidos inorgánicos no metálicos, y son útiles en procesos catalíticos y fotocatalíticos. El siguiente grupo está constituido de NM semiconductores. Los semiconductores son la base para los avances tecnológicos actuales, estos NM son útiles en aplicaciones electrónicas, ópticas, fotovoltaicas, computacionales, en comunicaciones y en fotocatalisis. El quinto grupo lo constituyen los NM poliméricos, utilizados en construcción y diseño de materiales de alta tecnología. El último grupo de NM está formado por los que se fabrican mediante lípidos y son utilizados en medicina (Khan y col., 2019:3).

Otro factor de interés en el conocimiento de los nano materiales, es la metodología utilizada para sintetizarlos. En general existen dos rutas, de abajo

hacia arriba (bottom-up), y de arriba hacia abajo (Top-down) - ver figura 2- que también podemos dividir en síntesis químicas y físicas; cada una tiene sus ventajas y limitaciones. Debido a su extensión, el estudio completo de estas rutas requiere la escritura de otro documento. En la primera se parte de materiales simples (átomos, moléculas, iones) para construir el material que tenga las dimensiones y propiedades deseadas. Incluye procesos tales como sol gel, síntesis biológica (utilizando bacterias, levaduras, hongos, algas y algunas plantas), depósitos mediante plasma y síntesis bioquímica. En la segunda ruta se procede al contrario, se parte de materiales de gran tamaño; mismos que van siendo reducidos para obtener las dimensiones y propiedades deseadas. Se conocen una gran variedad de procesos, tales como molienda, depósito físico de vapor, ablación láser, erosión catódica, ataque químico, entre otros (Prajitha y col., 2019:4) (Khan y col., 2019:5).

Métodos para la obtención de nanomateriales		
De arriba hacia abajo(top-down)	De abajo hacia arriba (bottom-up)	
	Síntesis	Síntesis biológica
I) Molienda mecánica II) Desbaste químico III) Erosión catódica por RF IV) Ablación láser	I) Por giro II) Aerosol usando flama o plasma III) Pirólisis por láser IV) Deposito químico de vapor	I) Por bacterias II) Por levaduras III) Por algas IV) Por plantas

Figura 2. Métodos de obtención de los NM (Khan y col., 2019b:5).

Como se puede deducir, se tiene una enorme variedad de nano materiales. Y un gran potencial para obtener incluso más, que sean más eficaces para satisfacer las necesidades presentes y futuras.

Para completar la descripción de los nano materiales, es necesario conocer el origen de las propiedades que los hacen tan útiles. En general se puede decir que dichas propiedades provienen, además de su naturaleza química, su tamaño y su forma. Sus dimensiones son cercanas al de las moléculas (Å); mientras

que su forma es acorde a la descripción que se hizo respecto a los NM 0D, 1D, 2D y 3D. Estas características particulares, tamaño y forma, en conjunto con su naturaleza química, modifican sus propiedades ópticas y eléctricas, comparadas con las del material en volumen. Este cambio en propiedades, se debe a que tienen una prevalencia de la superficie respecto al volumen; y al confinamiento del movimiento de sus electrones en cierta dimensión o dimensiones, de acuerdo al material 0D, 1D, 2D o 3D (Schmid, 2011:371).

3. Riesgos de los nano materiales

Un análisis completo, de los riesgos y efectos a la salud causados por los NM, requeriría la escritura de un libro, o tal vez varios. Por lo cual, en este documento se presentan los aspectos más importantes relacionados con los riesgos y efectos originados por los NM.

3.1. El agua

La revisión de la contaminación del agua es fundamental, dado que es vital para la vida de todos los seres vivos. En virtud de su importancia, se inicia revisando los riesgos y efectos nocivos de los nanomateriales (NM) en medio acuoso.

Como ya se mencionó, la producción de NM está en aumento. Después de su vida útil, muchos NM llegan a ríos, lagos, descargas residuales, y a los océanos. Estos materiales proceden de cosméticos, pinturas, pigmentos, recubrimientos, laboratorios de investigación, y las industrias farmacéutica, electrónica y textil (Cervantes-Avilés y col., 2017:252). En medio acuoso los NM tienen transformaciones físicas y químicas que afectan su toxicidad, ver figura 3. Respecto a los puntos cuánticos (NM semiconductores OD); una transformación importante es la aglomeración, obteniéndose partículas de mayor tamaño. Otro aspecto importante es la reducción del oxígeno y del agua, por efecto de la radiación solar, para producir radicales hidroxilos (OH^-) y peróxido (O_2^-) muy reactivos. Se dan varias transformaciones más, tales como pérdida de ligante, pérdida de coraza (la coraza es un semiconductor no tóxico que envuelve al semiconductor activo), cambio en carga superficial, disolución en el medio, adsorción de otras especies químicas, e incluso neutralización mediante otras especies químicas, polímeros o ligantes (Rocha y col., 2017:2). Procesos similares se darán en los otros tipos de NM; la intensidad de los cambios dependerá del tamaño, especies químicas presentes en el medio, radiación solar y de su naturaleza.

Los principales problemas en especies acuáticas durante su etapa larvaria son: mortalidad, daño en la

cubierta del embrión, disminución del grado de eclosión, apoptosis [muerte de células dañadas], alteraciones vasculares, daño al sistema nervioso, malformaciones, e incremento de las metalotioneínas [materiales que pueden unirse a los átomos de metales pesados] (MT). Los problemas durante su etapa adulta son: acumulación y lesión en el hígado, así como en el sistema digestivo, daños en el DNA, baja actividad de las enzimas antioxidantes y producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Otra preocupación es la cadena alimenticia, que llevaría estos contaminantes a la boca de los humanos, ver figura 4 (Rocha y col., 2017:14).

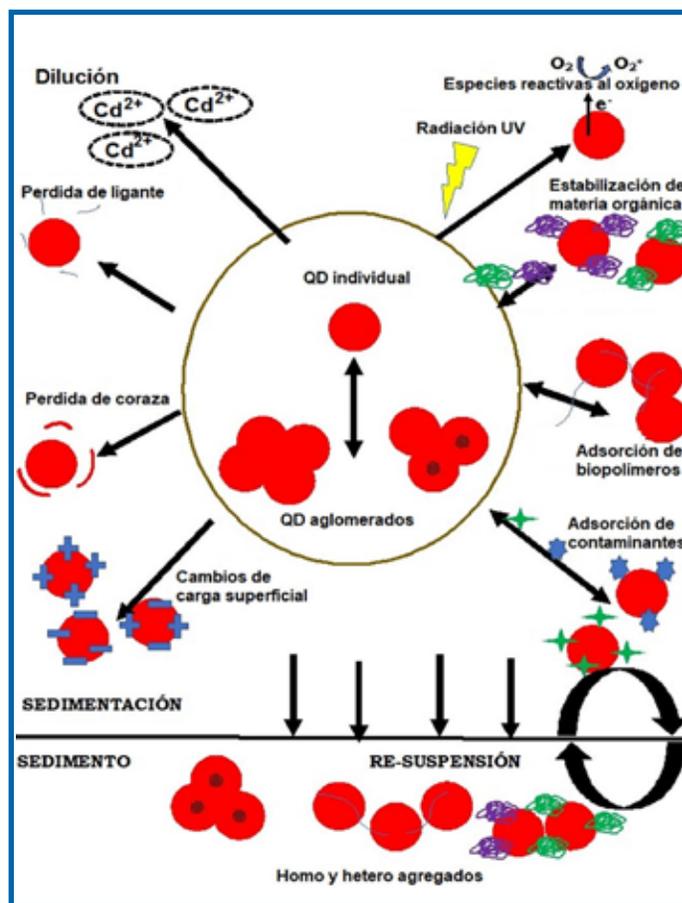


Figura 3. Transformaciones de los nanomateriales en medio acuoso (Rocha y col., 2017:3)

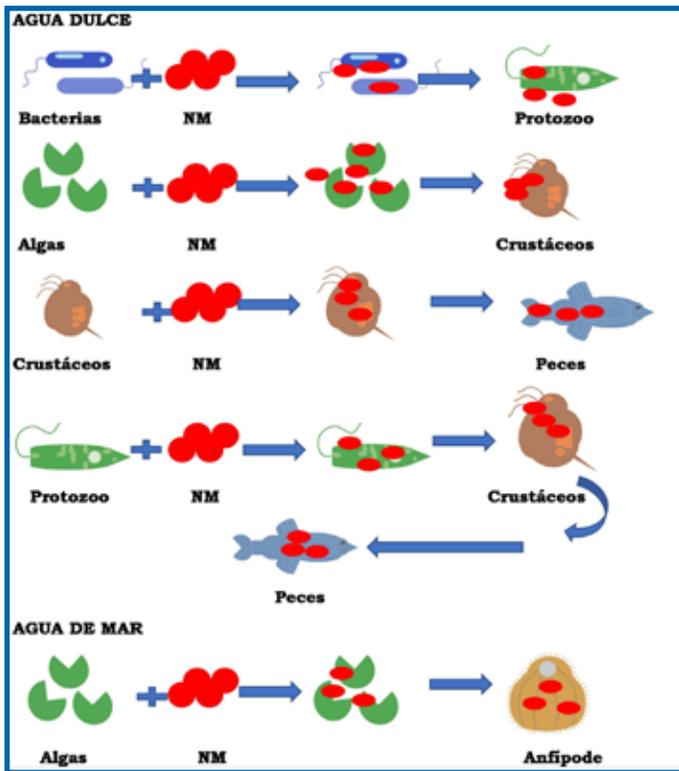


Figura 4. Cadena de dispersión de los nanomateriales en los sistemas acuáticos (Rocha y col., 2017:15).

Otros sistemas acuáticos importantes son las aguas residuales, y las plantas de tratamiento que las contienen y tratan antes de liberarse. En estas plantas de tratamiento se dan los fenómenos ya mencionados de aglomeración, enlazamiento con otras especies químicas, y si está abierto a la radiación solar, también se dará la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Estos cambios ayudan a que, mediante el proceso estándar de tratamiento, los NM se encuentren en una gran mayoría en el lodo residual (90%) y muy poco en el agua tratada. Se han encontrado altas concentraciones de NM en los reactores de las plantas de tratamiento. Lo cual indica una acumulación, que provoca efectos adversos en los microorganismos utilizados en el proceso, derivando en un mal funcionamiento de las plantas. También es preocupante la cantidad de NM que están saliendo con el agua tratada e incorporándose al sistema de aguas. Y contaminan diversos ecosistemas. También es preocupante la disposición final de los lodos residuales (Brar y col., 2010:517) (Cervantes-Avilés y col., 2017:254).

3.2. El aire

La contaminación del aire es también de gran importancia; dado que ingresa continuamente en nuestro organismo. La impurificación del aire con NM se focaliza en las grandes ciudades, tal como la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. En este aire contaminado se encuentran materiales peligrosos tales como, compuestos de hierro magnéticos y NM derivados de combustión y fricción. Estos materiales cuyas dimensiones son menores que 100 nm causan daños en las células y órganos, incluidos corazón y cerebro; es por esto que estos NM se consideran factores de riesgo para enfermedades cardiovasculares y Alzheimer (Calderón-Garcidueñas y col., 2019:2).

Los efectos de NM en el cuerpo humano dependen de la vía de acceso, tamaño, naturaleza química y concentración; además, de la condición médica particular de cada individuo. Los medios de ingreso pueden ser el sistema respiratorio y el sistema digestivo; los órganos afectados pueden ser el cerebro, corazón, hígado, pulmones y bazo, ver figura 5. En cada caso la severidad es variable, de acuerdo con los factores mencionados. La ruta de acceso de los NM a las células se muestra en la figura 6. Dicha ruta es traspasando la pared celular, cuando su tamaño lo permite; o mediante endocitosis; ya en el interior de la célula, traspasa la pared que los contiene y daña las mitocondrias y al citoplasma. A continuación, de acuerdo con las condiciones particulares, ingresa al núcleo y daña al DNA (Calderón-Garcidueñas y col., 2019:5).

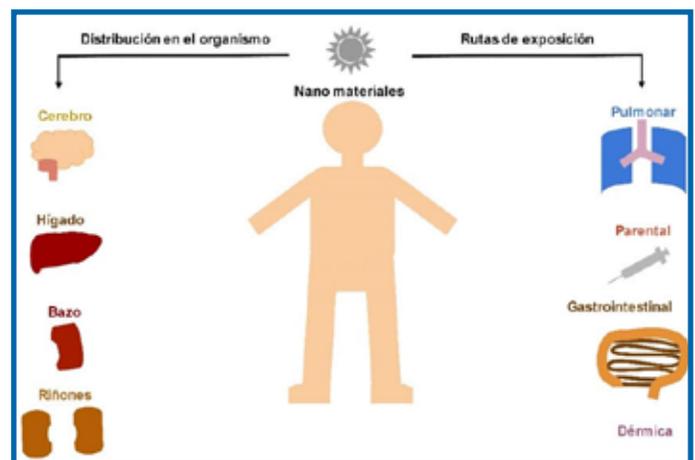


Figura 5. Entrada de NM al organismo, y órganos donde se acumulan (Najahi-Missaoui y col., 2021:5).

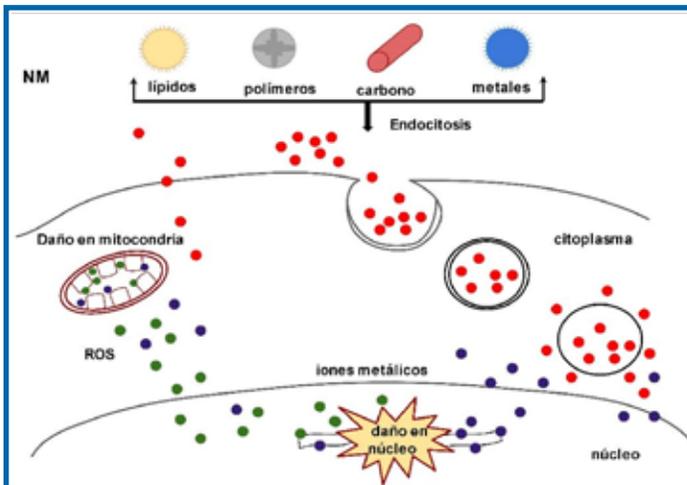


Figura 6. Rutas de acceso de los NM al interior de las células (Najahi-Missaoui y col., 2021:6).

3.3. Nano materiales que contienen cadmio

Un NM de especial interés por su toxicidad es el cadmio. Los NM que contienen cadmio se encuentran en diversos productos de consumo humano; entre estos, los que presentan mayor concentración son los mariscos y vegetales de hoja verde (Genchi y col., 2020:3).

Para los puntos cuánticos de CdTe/CdSe, en un estudio in vitro (aquel en el que se utilizan células vivas fuera de un organismo, en este caso se utilizó la línea L929 de fibroblastos de ratón, que es el tipo más común de células del tejido conectivo y están presentes en la piel, tendones, y otras partes duras del organismo), se encontró que 7 µg/mL es la concentración máxima permitida, mayores concentraciones generan daño por estrés oxidativo en el ADN. Además, arriba de 7 µg/mL, se encontró un incremento de la apoptosis (autoeliminación de las células dañadas irreversiblemente) en el hígado (Zhang y col., 2015:13444).

Un hallazgo importante es que los puntos cuánticos pueden cruzar la barrera hematoencefálica e ingresar al sistema nervioso central; lo cual, para el caso de un material tóxico trae graves consecuencias. Pero si los puntos cuánticos no son tóxicos, se pueden usar para transportar medicamentos específicos al sistema nervioso central (Wang y Tang, 2021:5).

Para el uso médico de los puntos cuánticos (principalmente de cadmio, debido a su fluorescencia). Estos se encapsulan mediante una coraza fabricada de otro semiconductor no tóxico, y el material resultante tiene baja toxicidad y buena

compatibilidad con el medio. El riesgo, ya corroborado, es que el cadmio se libera en el citoplasma de las células. Este cadmio liberado causa daño en las mitocondrias e incluso en el DNA del núcleo (Mo y col., 2017:14).

3.4. Nano materiales que contienen selenio

El selenio es un nutriente esencial para el reino animal y vegetal; por desgracia, para concentraciones mayores al requerimiento homeostático, es tóxico. Esta toxicidad involucra la formación de especies químicas reactivas de oxígeno, y su manifestación se observa en los tejidos, en el DNA y en la generación de cáncer. La selenosis crónica (ingesta excesiva crónica) en el ser humano se manifiesta en las uñas y cabello quebradizos, daños en la piel, anomalías neuronales, náuseas, vómitos, diarrea y complicaciones cardiovasculares (Sharma y col., 2017:405). En un estudio utilizando ratas, se les intoxicó debajo del nivel crónico con nanopartículas de CdO y PbO, juntos y separados; encontrándose que el órgano más dañado utilizando CdO fue el hígado, mientras que el PbO deterioró más a los riñones (Klinova y col., 2021:2).

4. Soluciones para atenuar la problemática

Un primer enfoque es fabricar NM que no sean tóxicos, el segundo es remediar el daño ya existente y que se sigue agravando. El primer enfoque se debe implementar de manera generalizada, para que no salgan al mercado productos tóxicos.

En el primer enfoque existen diversas opciones. La primera opción es mejorar los NM base lípidos y se trata de utilizar lípidos de nueva generación, aquellos que combinan funciones éster y radicales hidrofóbicos de alcanos. Los NM resultantes son más fáciles de desechar del plasma sanguíneo, y se ha observado una mejora en la tolerancia mediante pruebas in vivo. Una segunda opción es depositar una capa protectora sobre la superficie de los NM. La cubierta es fabricada de diversos materiales, y mejora la biocompatibilidad, el desempeño de los NM, evita la toxicidad y facilita su eliminación del organismo. Algunos de los materiales utilizados para cubrir la superficie son: polietilenglicol, poli N-iso propil acrilamida, poli carboxibetaina, polivinil pirrolidona, poli sulfobetaina, dextrano y quitosano. Una tercera opción es la impurificación química, la cual consiste en adicionar

átomos de un elemento extraño en una relación de uno a $10^4 - 10^5$; los elementos más utilizados para impurificar son, aluminio, titanio y hierro. Esta impurificación modifica las propiedades eléctricas, ópticas y de superficie de los NM, lo cual disminuye la liberación de tóxicos y la generación de especies reactivas de oxígeno. La cuarta opción es la modificación de las propiedades superficiales de los NM; entre ellas la hidrofobicidad y la densidad de carga superficial; dicho ajuste se puede obtener mediante la unión covalente con grupos funcionales aniónicos, catiónicos y no iónicos. Una quinta opción es modificar las propiedades fisicoquímicas de los NM; dentro de estas propiedades están la solubilidad, la generación de iones y la aglomeración. Dichas propiedades eliminan o limitan la toxicidad de los NM (Najahi-Missaoui y col., 2021:11).

En el segundo enfoque, el proceso a llevar a cabo se conoce como remediación. Este proceso considera procedimientos químicos, fisicoquímicos, mecánicos, eléctricos y térmicos mediante los cuales se elimina o reduce uno o más agentes contaminantes de un sistema. En este enfoque, hay que adicionar a la contaminación ocasionada por NM los añejos, y aún persistentes, daños ocasionados por combustibles, pesticidas, fungicidas, herbicidas, desechos de minería y aguas residuales de todas las ciudades. Se conocen tres estrategias para llevar a cabo la remediación. La primera es destruir el contaminante, alterándolo químicamente; la segunda es extraer el contaminante, retirándolo del sistema que está dañando; y la tercera es inmovilizar al contaminante, para que no cause daño a los seres vivos. Puede aplicarse más de una estrategia, dependiendo del daño existente.

Respecto a los contaminantes tradicionales, ya mencionados, existe una gran cantidad de tecnologías y metodologías ampliamente conocidas (Delgadillo-López y col., 2011:598-605; Said Aabida y Arnaiz Franco, 2018:39-64; SEMARNAT, 2011:9-56).

En el caso de los NM, un primer eslabón para su propagación son las aguas residuales; su tratamiento adecuado puede evitar que los NM se dispersen hacia ríos, lagos y océanos. Materiales que han resultado efectivos son los puntos cuánticos de carbono; mediante adsorción remueven de una solución acuosa materiales tóxicos, tales como cadmio y plomo. Estos puntos cuánticos adsorben mejor a pH básico, cuando el pH disminuye su capacidad de adsorción disminuye. También se ha trabajado

utilizando los puntos cuánticos de carbono dopados con nitrógeno, y se observó una mejora de su capacidad de adsorber cadmio y plomo (Rani y col., 2020:12). Una condición observada en las plantas de tratamiento de aguas residuales, es la sulfuración de los NM de plata, esto ocurre durante los procesos anaerobios del tratamiento (Kaegi y col., 2013:3867). También se trabaja usando nanotubos de carbono de paredes múltiples, para la sorción de contaminantes tóxicos, tales como plomo, cobre y cadmio. En otra investigación se trabajó utilizando nanopartículas de dióxido de titanio. Mismas que, mediante fotocatalisis, realizan la eliminación de los NM orgánicos e inorgánicos (Savage y Diallo, 2005:333) (Velasco-Hernández y col., 2020:6).

Dentro del segundo enfoque, también es necesario remediar el daño existente en los suelos. En un estudio se utilizó bio carbón finamente dividido y mezclado con una solución de fosfato férrico y carboximetilcelulosa de sodio, como aditivos, en un suelo contaminado con cadmio. Los resultados fueron alentadores, inmovilizaron el cadmio y disminuyeron notablemente su acumulación en las plantas cultivadas (Qiao y col., 2017:516). Otra opción viable es utilizar plantas (fitorremediación) para remediar suelos contaminados con metales pesados. Se ha encontrado que el girasol es eficiente para remediar suelos; siempre que las concentraciones de metales pesados estén por debajo de 50 ppm (Genchi y col., 2020:15). También, en este segundo enfoque, se encuentra la eliminación de contaminantes del aire. En este ámbito se utilizaron nanopartículas de dióxido de silicio para adsorber plomo del ambiente; el estudio se realizó en una fábrica de baterías para automóviles (Yang y col., 2013:656).

Conclusiones y perspectivas

Es innegable el gran desarrollo y la utilidad de los NM. Sin embargo, se debe poner atención en sus aspectos negativos. La toxicidad de los nuevos materiales es un asunto importante, dado que muchos inciden negativamente en la salud de los seres vivos. Entre estos seres vivos se incluye a plantas y animales, desde los unicelulares hasta los complejos, lo cual significa un riesgo de gran magnitud, que acumulativamente puede llegar incluso al ser humano. Este riesgo es grave, y es la razón

por la cual se deben implementar protocolos, e incluso leyes más estrictas, para que los NM sean revisados y dispuestos adecuadamente; y para que los daños presentes en suelos, aire y sistemas acuáticos sean remediados, o al menos disminuidas sus concentraciones a los niveles permitidos. No exhortamos a dejar de usar NM; salvo en los casos donde su uso sea peligroso a la salud. Es recomendable tomar las medidas de seguridad al sintetizar y utilizar estos materiales; así como avanzar en la búsqueda de NM más eficaces y seguros. Y, sobre todo, crear conciencia social para que los nano materiales, al final de su vida útil, sean dispuestos adecuadamente; siguiendo buenas prácticas de laboratorio, o de residuos peligrosos; según corresponda a los centros de investigación, a hospitales e industrias, e incluso al hogar, taller u oficina.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo proporcionado por la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro mediante el Fondo Química Somos Todos (FQST).

Referencias bibliográficas

- Amaya, J., y Quiroga, W. [2019]. Nano materiales : una clasificación desde sus dimensiones. *Revista Química e Industria*, (January), 7-12.
- Brar, S. K., Verma, M., Tyagi, R. D., y Surampalli, R. Y. [2010]. Engineered nanoparticles in wastewater and wastewater sludge - Evidence and impacts. *Waste Management*, 30(3), 504-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.012>
- Calderón-Garcidueñas, L., González-Maciel, A., Mukherjee, P. S., Reynoso-Robles, R., Pérez-Guillé, B., Gayosso-Chávez, C., Maher, B. A. [2019]. Combustion- and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts. *Environmental Research*, 176(June), 108567. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108567>
- Cervantes-Avilés, P., Souza-Brito, E., Bernal-Martínez, A., Antonio Reyes-Aguilera, J., de la Rosa, G., y Cuevas-Rodríguez, G. [2017]. Impacto de los nanocontaminantes en biorreactores aerobios para tratamiento de aguas residuales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 247-260. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/620/62049878024.pdf>
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., y Acevedo-Sandoval, O. [2011]. Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., y Catalano, A. [2020]. The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(August), 24. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Kaegi, R., Voegelin, A., Ort, C., Sinnet, B., Thalmann, B., Krismer, J., Mueller, E. [2013]. Fate and transformation of silver nanoparticles in urban wastewater systems. *Water Research*, 47(12), 3866-3877. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.060>
- Khan, I., Saeed, K., y Khan, I. [2019a]. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Khan, I., Saeed, K., y Khan, I. [2019b]. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Klinova, S. V., Katsnelson, B. A., Minigalieva, I. A., Gerzen, O. P., Balakin, A. A., Lisin, R. V., Protsenko, Y. L. [2021]. Cardiotoxic effects in subchronic intoxication of rats with lead and/or cadmium oxide nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.3390/ijms22073466>
- Kruis, F. E., Fissan, H., y Peled, A. [1998]. SYNTHESIS OF NANOPARTICLES IN THE GAS PHASE FOR ELECTRONIC, OPTICAL AND MAGNETIC APPLICATIONS: A REVIEW (J. Aerosol Sci. Vol. 29, No. 56, pp. 511-535, 1998).pdf, 29(5), 511-535.
- Lewinski, N., Colvin, V., y Drezek, R. [2008]. Cytotoxicity of nanoparticles. *Small*, 4(1), 26-49. <https://doi.org/10.1002/sml.200700595>
- Mo, D., Hu, L., Zeng, G., Chen, G., Wan, J., Yu, Z., Cheng, M. [2017]. Cadmium-containing quantum dots: properties, applications, and toxicity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(7), 2713-2733. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8140-9>
- Najahi-Missaoui, W., Arnold, R. D., y Cummings, B. S.

- [2021]. Safe nanoparticles: Are we there yet? *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ijms22010385>
- Prajitha, N., Athira, S. S., y Mohanan, P. V. [2019]. Bio-interactions and risks of engineered nanoparticles. *Environmental Research*, 172(February), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.003>
- Qiao, Y., Wu, J., Xu, Y., Fang, Z., Zheng, L., Cheng, W., Zhao, D. [2017]. Remediation of cadmium in soil by biochar-supported iron phosphate nanoparticles. *Ecological Engineering*, 106, 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.023>
- Rani, U. A., Ng, L. Y., Ng, C. Y., y Mahmoudi, E. [2020]. A review of carbon quantum dots and their applications in wastewater treatment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 278, 102124. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102124>
- Rocha, T. L., Mestre, N. C., Sabóia-Morais, S. M. T., y Bebianno, M. J. [2017]. Environmental behaviour and ecotoxicity of quantum dots at various trophic levels: A review. *Environment International*, 98, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.09.021>
- Said Aabida, A., y Arnaiz Franco, M. C. [2018]. Tecnologías físico-químicas en la regeneración de suelos contaminados, 1–159.
- Savage, N., y Diallo, M. S. [2005]. Nano materials and water purification: Opportunities and challenges. *Journal of Nanoparticle Research*, 7(4–5), 331–342. <https://doi.org/10.1007/s11051-005-7523-5>
- Schmid, G. [2011]. *Nanoparticles From Theory to Application*. [G. Schmid, Ed.], SpringerReference (2nd ed.). KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH y Co. https://doi.org/10.1007/springerreference_67330
- SEMARNAT. [2011]. Tecnologías de Remediación de suelos contaminados más utilizadas.
- Sharma, V. K., McDonald, T. J., Sohn, M., Anquandah, G. A. K., Pettine, M., y Zboril, R. [2017]. Assessment of toxicity of selenium and cadmium selenium quantum dots: A review. *Chemosphere*, 188, 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.130>
- Velasco-Hernández, A., Esparza-Muñoz, R. A., de Moure-Flores, F. J., Santos-Cruz, J., y Mayén-Hernández, S. A. [2020]. Synthesis and characterization of graphene oxide – TiO₂ thin films by sol-gel for photocatalytic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 114(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105082>
- Wang, Z., y Tang, M. [2021]. The cytotoxicity of core-shell or non-shell structure quantum dots and reflection on environmental friendly: A review. *Environmental Research*, 194, 110593. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110593>
- Yang, X., Shen, Z., Zhang, B., Yang, J., Hong, W. X., Zhuang, Z., y Liu, J. [2013]. Silica nanoparticles capture atmospheric lead: Implications in the treatment of environmental heavy metal pollution. *Chemosphere*, 90(2), 653–656. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.033>
- Zhang, T., Wang, Y., Kong, L., Xue, Y., y Tang, M. [2015]. Threshold dose of three types of quantum dots (QDs) induces oxidative stress triggers DNA damage and apoptosis in mouse fibroblast L929 cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), 13435–13454. <https://doi.org/10.3390/ijerph121013435>

