

Artículo de Divulgación

Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología

An approach to the fundamentals and applications of nanotechnology

René Renato Balandrán Quintana^{1*}, Ana María Mendoza Wilson¹

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46. Col. La Victoria, C.P. 83304, Hermosillo, Son., México

*Correspondencia: rbalandran@ciad.mx (René Renato Balandrán Quintana)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.861>

Recibido: 02 de octubre de 2021; Aceptado: 12 de octubre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

La nanotecnología consiste en la comprensión, manipulación y aprovechamiento de las propiedades que tienen los materiales en la nanoescala, es decir, en dimensiones que se encuentran en el rango de 1 a 100 nm, para desarrollar productos con utilidad práctica. En la década de 1990 inició la revolución nanotecnológica gracias a una mejor comprensión de las propiedades de la materia en la nanoescala. Estas propiedades novedosas se derivan de una gran área superficial e incluyen una mayor reactividad química, depresión de las temperaturas de fusión, alta resistencia mecánica, elevada conductividad eléctrica, efectos ópticos inusuales, entre otras. La nanotecnología permite el desarrollo de materiales innovadores con aplicaciones en todas las ramas de la industria. Destacan las industrias biomédica, farmacéutica, electrónica, química, alimentaria, agrícola, de la construcción, textil, cosmética, de deportes y manufacturera. A pesar de estar presente en artículos de uso cotidiano, la sociedad tiene percepciones erróneas sobre la nanotecnología, principalmente debido a la desinformación. La presente comunicación tiene como objetivo informar objetivamente sobre el concepto de nanotecnología a través de presentar, de una manera sencilla, los fundamentos de esta disciplina y ofrecer ejemplos de aplicaciones reales.

Palabras clave: nanociencias, nanomateriales, bionanotecnología, divulgación tecnológica, nanopartículas.

Abstract

Nanotechnology consists of the understanding, manipulation and use of the properties that materials have at the nanoscale, whose dimensions are in the range of 1 to 100 nm, for the development of devices with practical utility. In the 1990s, the nanotechnology revolution began thanks to a better understanding of the properties of matter at the nanoscale. These novel

properties are derived from a large surface area and include greater chemical reactivity, depression of melting temperatures, high mechanical strength, high electrical conductivity, unusual optical effects, among others. Nanotechnology allows the development of innovative materials with applications in practically all branches of industry. The biomedical, pharmaceutical, electronic, chemical, food, agricultural, construction, textile, cosmetic, sports and manufacturing industries stand out. Despite being present in articles of daily use, society has erroneous perceptions about nanotechnology, mainly due to misinformation. The objective of this communication is to objectively inform about the concept of nanotechnology by presenting, in a simple way, the fundamentals of this discipline and offering examples of real applications.

Keywords: nanosciences, nanomaterials, bionanotechnology, technology dissemination, nanoparticles.

Introducción

La nanotecnología está en nuestra vida diaria, pero pasa desapercibida. Esto se debe a múltiples factores. Por un lado, en nanotecnología se utilizan con frecuencia materiales que nos resultan familiares, porque se encuentran presentes en artículos de uso cotidiano. Por otra parte, desde hace unas décadas estamos tan acostumbrados al acelerado avance tecnológico que rara vez reflexionamos sobre los mecanismos que hacen posible este. Si a ello se suma una mala publicidad, los resultados pueden ser desastrosos en términos de la aceptación pública.

No ha faltado quien publicite la nanotecnología como la creación de nano robots que como plaga van a consumir la tierra, o que pueden ser introducidos en el cuerpo para llevar a cabo viajes fantásticos y apoderarse de la voluntad de los seres humanos, todo al puro estilo de las películas de ciencia ficción. La realidad es que esto último carece de fundamentos, pero provoca reacciones violentas por parte de grupos extremistas, como fue el caso de ataques con paquetes bomba enviados a científicos mexicanos expertos en nanotecnología (SciDevNet, 2011). Pero sin duda lo que más prevalece es la desinformación. En una encuesta reciente se demostró que la sociedad mexicana tiene ideas erróneas sobre la nanotecnología. Si bien la muestra de la población encuestada fue relativamente pequeña, los resultados hicieron patente la necesidad de brindar al público en general información objetiva sobre el tema (Camarillo-Abad *et al.*, 2019).

En el presente artículo se presentan, de una forma narrativa, los fundamentos de la nanotecnología y la línea del tiempo en cuanto a su desarrollo. Se explica por qué los materiales en la nanoescala tienen propiedades únicas y cómo se pueden aprovechar estas para encontrar soluciones innovadoras a problemas reales. También se dan ejemplos de diferentes tipos de nanomateriales y los métodos de producción.

La escala de tamaños

Para una mejor comprensión de la nanotecnología, primero es necesario ubicar la escala de tamaños. Para efectos prácticos, sólo nos referiremos a las porciones de la escala que permiten explicar a qué parte de esta corresponden los nanomateriales, lo que se señala en la Fig. 1. Se recomienda visitar el sitio de internet Nanowerk para observar un video en el que se muestran

imágenes reales que comprenden desde la escala astronómica hasta la de las partículas subatómicas (Nanowerk, 2021).

El prefijo *micro* significa una millonésima parte de algo, así que en unidades de longitud un micrometro o micra (μm) es la millonésima parte de un metro ($1\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$). El prefijo *nano* indica una milmillonésima, por lo que, en unidades de longitud, un nanómetro (nm) es la milmillonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). Mediante un cálculo sencillo se encuentra que $1 \mu\text{m} = 1,000 \text{ nm}$. La escala micrométrica o microscópica es la que corresponde a tamaños entre 1 y 1,000 μm (0.001–1 mm), seguida por la macroescala ($>1 \text{ mm}$). En la escala subnanométrica están los tamaños inferiores a 1 nm, que corresponden al tamaño de moléculas, átomos y partículas subatómicas.

Lo anterior puede llevar a pensar, con toda lógica, que la escala nanométrica se encuentra dentro del rango de 1–1,000 nm. Sin embargo, por razones que se exponen más adelante, se determinó que la escala nanométrica, también llamada mesoescala o nanoescala, es aquella entre 1 y 100 nm. Los tamaños que se encuentran entre 100 y 1,000 nm, se dice que pertenecen a la escala submicrométrica o submicroscópica.

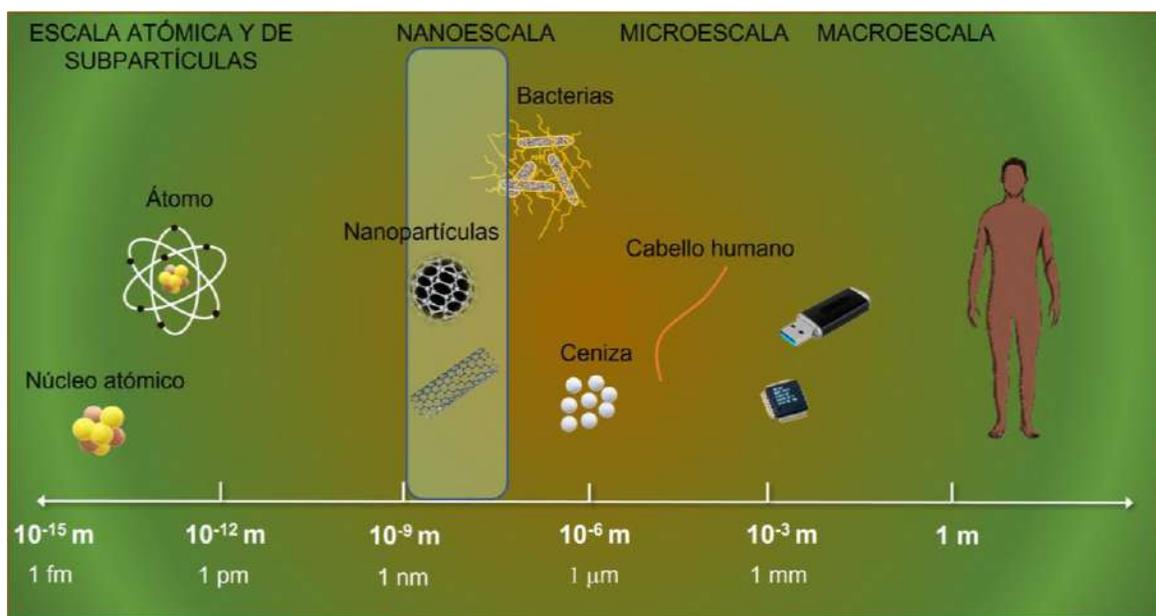


Figura 1. Esquema que ubica aproximadamente la escala nanométrica, para dar una idea de las dimensiones de los nanomateriales. Los objetos no están dibujados a escala, sólo es una representación para efectos comparativos.

Figure 1. Scheme that approximately locates the nanometric scale, to give an idea of the dimensions of nanomaterials. The objects are not drawn to scale; it is only a representation for comparison purposes.

En la microescala se encuentran cosas tan pequeñas como las partículas de polvo, los microorganismos y aun nuestras mismas células. Para observarlos es necesario un microscopio óptico, como del que se dispone en casi cualquier laboratorio. No obstante, para la observación en la escala nanométrica se requieren microscopios más potentes, como los de transmisión y de barrido de electrones. Algo tan delgado como un cabello humano, tiene un diámetro promedio de

80 μm , es decir 80,000 nm. Así, el tamaño de los objetos en la nanoescala es entre 8,000 y 80,000 veces más pequeño que el grueso de un cabello. Si una persona con una estatura de 1.70 m se encogiera hasta alcanzar el tamaño de 1 nm, el grosor de una hoja de papel ordinario (0.1 mm) representaría 170 km para esa persona. Estos ejemplos dan una idea clara de lo diminutas que son las dimensiones de los nanomateriales. Una vez ubicada la escala de tamaños, se puede comenzar a hablar de nanotecnología.

Definición de nanotecnología

La nanotecnología consiste, por una parte, en la fabricación de materiales cuyo tamaño es nanométrico, es decir, entre 1 y 100 nm, en al menos una de sus dimensiones. Aquí cabe hacer un paréntesis para mencionar que los nanomateriales se clasifican como cerodimensionales (0D), unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), según el número de dimensiones que tienen en la nanoescala (Fig. 2).

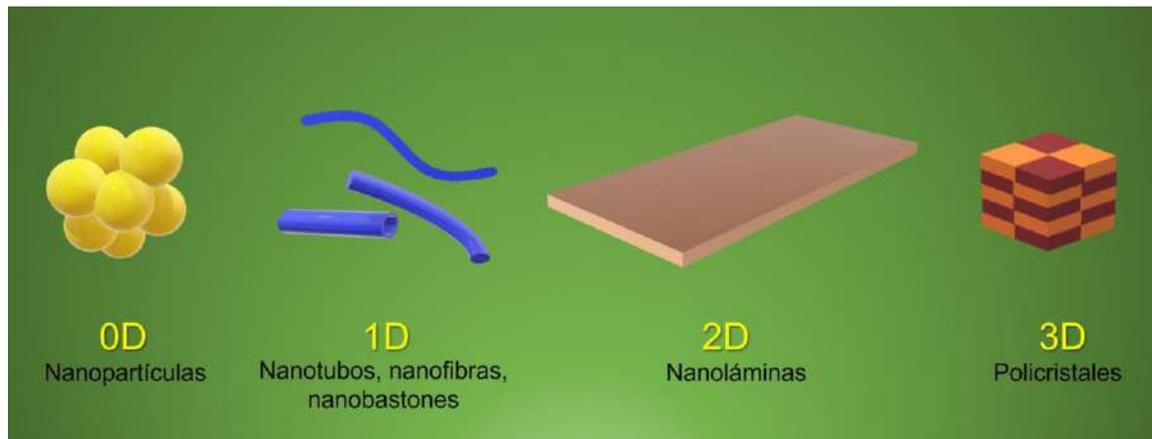


Figura 2. Clasificación de los nanomateriales de acuerdo con sus dimensiones y ejemplos genéricos de cada uno de ellos. El prefijo numérico indica el número de dimensiones que el material tiene en la macroescala, es decir >100 nm. Los nanomateriales 3D son conglomerados de nanopartículas que, en conjunto, son responsables por las propiedades únicas de ese material, generalmente son sólidos cristalinos.

Figure 2. Classification of nanomaterials according to their dimensions and generic examples of each of them. The numerical prefix indicates the number of dimensions that the material has on the macroscale, that is >100 nm. 3D nanomaterials are conglomerates of nanoparticles that, together, are responsible for the unique properties of that material, generally they are crystalline solids.

Un nanomaterial 0D es aquel en el que sus tres dimensiones están reducidas a la escala nanométrica, por ejemplo, una nanopartícula. En los 1D, solo dos de las dimensiones están en la nanoescala nanométrica, las nanofibras y los nanotubos son buenos ejemplos de ello ya que tienen un diámetro nanométrico y un largo superior a los 100 nm, el que incluso puede ser de varios μm . Los nanolaminados o nanopelículas son representativos de los nanomateriales 2D, donde sólo una dimensión (el grosor) es nanométrica, mientras que la longitud y anchura están en las escalas microscópica o macroscópica. Por último, los nanomateriales 3D están constituidos generalmente por cristales de tamaño nanométrico, los que se agrupan mediante interacciones físicas hasta formar estructuras macroscópicas.

En el rango de tamaños de 1–100 nm, los materiales presentan propiedades muy diferentes a las que tienen en las escalas macroscópicas, submicroscópica o subnanométrica, aunque hay excepciones. La otra parte de la nanotecnología es aprovechar esas propiedades únicas que surgen en la nanoescala, para construir, a partir de los nanomateriales, dispositivos y artículos novedosos con utilidad práctica, o bien introducir mejoras innovadoras en los ya existentes. Otro aspecto distintivo de la nanotecnología es que se realiza con fundamento científico, lo cual es imprescindible, pues estudiar y manipular los cambios que experimenta la materia al pasar de una escala de tamaño a otra requiere de conocimiento científico y, en algunos casos, alto grado de sofisticación (Borisenko and Ossicini, 2008). No obstante, es de destacar que el uso de algunos nanomateriales se remonta a épocas pasadas.

Uso de los nanomateriales en la antigüedad y en la Edad Media

Aunque el conocimiento científico de las propiedades de los nanomateriales ha tenido su mayor avance en el Siglo XX, en la antigüedad y la Edad Media estos ya se utilizaban, quizá inadvertidamente. Entre los ejemplos más utilizados sobre el uso de nanomateriales en la antigüedad están las espadas de Damasco y la copa de Licurgo. Las espadas de acero de Damasco eran famosas por su fortaleza mecánica y filo “eterno”.

En la época actual se descubrió, mediante microscopía electrónica de alta resolución, la presencia de nanotubos de carbono en una espada auténtica de Damasco del Siglo XVII (Reibold *et al.*, 2006). Los nanotubos de carbono son partículas nanométricas provistas de una alta resistencia mecánica, que seguramente se formaban durante el forjado del acero al alto carbono que se utilizaba para fabricar las espadas de Damasco, lo cual explica las características tan particulares de estas.

Por otra parte, la copa de Licurgo (Fig. 3), fabricada por los romanos en el Siglo V, D.C., está hecha de una matriz de vidrio en la que se encontraron, dispersas, nanopartículas de oro, plata y cobre con tamaños de entre 50 y 100 nm. Esto resulta en que la copa presente diferentes coloraciones, dependiendo de la dirección de la luz incidente (Loos, 2015). Hoy también se sabe que los efectos vistosos en los vitrales de las catedrales medievales son debidos a que contienen mezclas de nanopartículas de oro y plata (Loos, 2015). Más adelante, en el presente artículo, se revisan los fundamentos científicos que explican las propiedades ópticas de algunas nanopartículas metálicas.

El conocimiento científico en aquellas épocas no permitiría encontrar explicación para esos fenómenos, eran construcciones basadas en conocimiento empírico, producto de la habilidad artesanal, no puede decirse que ya existía la nanotecnología, al menos no formalmente. De igual manera, es necesario hacer notar que en la Naturaleza siempre han existido estructuras funcionales formadas por bloques de tamaño nanométrico, como el DNA, los virus, los complejos enzimáticos incrustados en las membranas celulares, por mencionar solo algunos. A esto último tampoco se le puede llamar nanotecnología porque en la construcción de tales estructuras no está involucrada la mano del hombre.



Figura 3. Copa de Licurgo, fabricada por los romanos en el Siglo V. Está hecha de una matriz de vidrio que contiene una mezcla de nanopartículas de oro, plata y cobre. La coloración es diferente dependiendo de si la fuente de luz se encuentra en el interior de la copa o incide desde el exterior.

Figure 3. Lycurgus Cup, made by the Romans in the 5th century. It is made of a glass matrix that contains a mixture of gold, silver and copper nanoparticles. The coloration is different depending on whether the light source is inside the glass or is incident from the outside.

Créditos a las imágenes (Image credits): (A) *DeBrit_Mus_13sept10_brooches_etc_044.jpg:Johnbodderivativevwork:Johnbod(talk)-Brit_Mus_13sept10_brooches_etc_044.jpg,CCBY-SA3.0,*

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11549754>; (B) De Desconocido - Marie-Lan Nguyen (2011), CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15475096>

Periodo de gestación de la nanotecnología

Las nanociencias y la nanotecnología tuvieron un avance relativamente lento al principio, como lo constata la línea del tiempo (Fig. 4). La idea visionaria de manipular la materia átomo por átomo para construir dispositivos útiles de tamaño nanométrico se atribuye a Richard Feynman, ganador del premio Nobel de Física, aunque no precisamente por ser el pionero intelectual de la nanotecnología, como muchos lo reconocen hoy.

En 1959, Feynman dictó una conferencia ante la Sociedad Americana de Física en la que visualizó objetivamente la posibilidad, en un futuro no muy lejano, de fabricar bloques moleculares a partir de átomos. A su vez, esos bloques podrían utilizarse para construir estructuras de mayor tamaño, y así sucesivamente, hasta finalmente llegar a dispositivos con alguna función preconcebida (Feynman, 1961). Es decir, síntesis química mediante manipulación mecánica. Aunque la idea parecía muy atractiva, en ese entonces y en los siguientes veintitantos años no existía posibilidad alguna de la manipulación átomo por átomo.



Figura 4. Línea del tiempo del avance de la nanotecnología, desde 1959 hasta la década de 1990. El suceso más importante durante este periodo fue la invención de los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica.
Figure 4. Timeline of the advancement of nanotechnology, from 1959 to the 1990s. The most important event during this period was the invention of tunneling and atomic force microscopes.

En 1974, el investigador Norio Taniguchi definió la nanotecnología como “el proceso de separación, consolidación y deformación de materiales por átomo o molécula” (Bayda *et al.*, 2019). Según la historia, esta fue la primera vez que se utilizó la palabra *nanotecnología*. Sin embargo, fue unos años más tarde, en la década de los 80s, cuando se cristalizó la idea de la manipulación átomo por átomo, una vez que se inventaron los microscopios de efecto túnel (Binnig *et al.*, 1982) y de fuerza atómica (Binnig *et al.*, 1986).

Utilizando conceptos teóricos cuya explicación está fuera del objetivo de este artículo, y haciendo uso de los avances en computación logrados hasta entonces, fue posible construir “puntas” con unos cuantos átomos de un cierto material. El acercamiento de esas puntas a la superficie de otro material permite “arrancar” átomos superficiales y posteriormente posicionarlos en otro lugar.

Así se obtuvieron imágenes muy llamativas a manera de demostración, como la que se muestra en la Fig. 4. Aunque este fue un hecho extraordinario, era y es absurdo construir dispositivos átomo por átomo, pues sería un proceso extremadamente lento. Los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica se utilizan para observar indirectamente átomos y moléculas, así como para caracterizar las propiedades físicas de los nanomateriales, sin embargo, su invención fue el punto de partida que originó una avalancha de investigaciones. El científico Eric Drexler, a través de la publicación de libros como *Engines of creation. The coming era of nanotechnology*, desempeñó un papel importante en cuanto a popularizar los potenciales de la nanotecnología molecular. Puede decirse que en la década de los 80s se estableció formalmente el concepto de nanotecnología, pero lo que sucedió unos cuantos años más adelante fue el detonante de una revolución.

Revolución nanotecnológica en la década de los 90s

En 1985 se descubrieron unas estructuras esféricas constituidas enteramente por átomos de carbono (ACS, 2010), a las que se les llamó Buckminsterfullerenos, en alusión a las estructuras arquitectónicas que distinguen al arquitecto Sir Buckminster Fuller. Estas esferas, también llamadas simplemente fulerenos, tienen 60 átomos de carbono. Se asemejan a un balón de fútbol soccer, consistente en 20 hexágonos y 12 pentágonos, donde cada uno de los vértices está ocupado por un átomo de carbono, como se muestra en la Fig. 5A.

Esta forma del carbono es diferente a las del diamante y el grafito y tiene propiedades inusuales, entre las que sobresale una elevada conductividad eléctrica. Posteriormente fue posible dividir el grafito en sus monocapas, cada una de las cuales se conoce como grafeno (Fig. 5B). El grafeno es otra forma de carbono de la familia de los fulerenos, que también posee propiedades únicas, como una elevada conductividad eléctrica, transparencia, flexibilidad y alta resistencia mecánica (Inagaki *et al.*, 2014).

En 1991 se descubrieron los nanotubos de carbono (Fig. 5C), los cuales se asemejan a láminas enrolladas de grafeno y que comparten algunas propiedades de este, como una elevada conductividad eléctrica y gran resistencia mecánica. Los nanotubos de carbono son partículas de 1–3 nm de diámetro interno, 2–100 nm de diámetro externo y 0.2 a varios μm de longitud (He *et al.*, 2013).

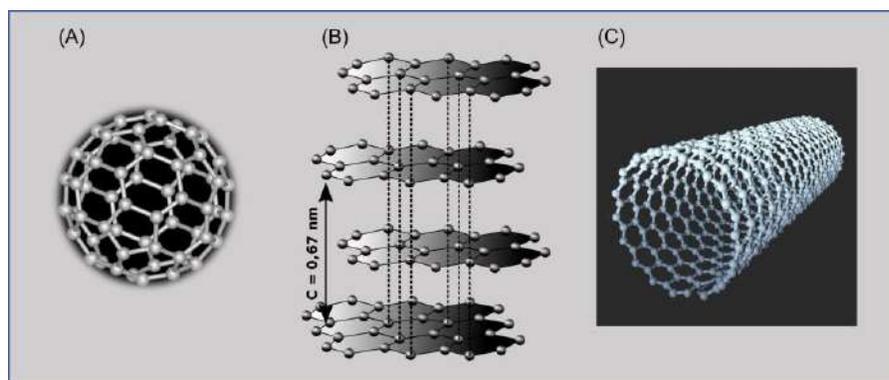


Figura 5. Representaciones de: (A) Estructura de los fulerenos; (B) estructura del grafito, constituido por monocapas de grafeno; (C) estructura de los nanotubos de carbono, los cuales consisten en láminas de grafeno “enrolladas”.

Figure 5. Representations of: (A) Structure of fullerenes; (B) structure of graphite, made up of graphene monolayers; (C) Structure of carbon nanotubes, which consist of “rolled” sheets of graphene.

Créditos a las imágenes (Image credits): (A) <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>; (B) *Capas grafito.svg* Anton (rp) 2004 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>; (C) *Encyclopædia Britannica* <https://www.britannica.com/science/carbon-nanotube#/media/1/956965/217195>

Aunque ya hacía años que se estudiaban los fenómenos superficiales y las propiedades de las nanopartículas, tal vez el descubrimiento de los fulerenos y posteriormente de los nanotubos de carbono fueron sucesos relevantes para que la nanotecnología se consolidara como disciplina. A esto último lo apoya la gran cantidad de publicaciones científicas que aparecieron a partir de 1990,

en cuyos títulos, resumen o palabras clave aparecen las palabras *nanotecnología* o *nanopartículas* (Fig. 6).

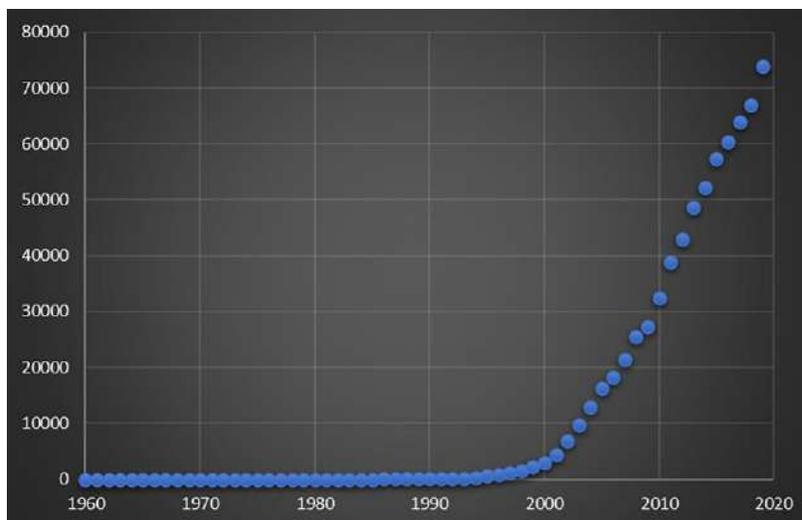


Figura 6. Número de publicaciones científicas en las que aparecen las palabras *nanotecnología* o *nanopartículas*, entre 1960 y 2020. Fuente: SCOPUS, consultado el 29 de septiembre de 2021.

Figure 6. Number of scientific publications in which the words *nanotechnology* or *nanoparticles* appear, between 1960 and 2020. Source: SCOPUS, consulted on September 29, 2021.

Importancia del tamaño nanométrico en la nanotecnología

Las propiedades físicas y químicas de la materia en la nanoescala son muy diferentes a las de la macroescala y las escalas atómica o subatómica. Las propiedades en la macroescala se predicen mediante las leyes de la Física clásica, mientras que las de átomos y partículas subatómicas mediante las de la Física cuántica, pero muchas de las propiedades en la nanoescala no se pueden explicar en su totalidad mediante ninguna de esas leyes, por lo que se recurre a modelos teóricos que corresponden tanto a unas como a otras.

El carácter innovador de la nanotecnología radica fundamentalmente en el conocimiento, manipulación y aprovechamiento de propiedades de la materia que surgen en el rango de 1 a 100 nm, las cuales eran desconocidas hasta hace poco. Esto es lo que determina si un nanomaterial es innovador y útil para que se le considere como artefacto nanotecnológico. Podrá haber nanomateriales para los cuales no se han encontrado propiedades nuevas utilizables, por lo que, mientras no se descubran, su sola producción no es del ámbito de la nanotecnología.

El estudio de los fenómenos que ocurren en la nanoescala es materia de las nanociencias. Con mucha frecuencia las nanociencias y la nanotecnología trabajan al unísono, pero hay una clara distinción entre ambas. Entonces, el tamaño definitivamente importa, pero en nanotecnología no lo es todo. Otras interrogantes de interés son cuáles son las propiedades únicas en la nanoescala, por qué surgen tan drásticamente y, sobre todo, cómo se aprovechan de tal suerte que son causa de toda una revolución.

Propiedades en la nanoescala que se derivan de un gran aumento en el área superficial

Cuando un material se somete a un proceso de reducción de tamaño, por ejemplo, hasta transformarlo en un polvo consistente en partículas de unos cuantos μm de diámetro, el área superficial total aumenta considerablemente. Al nivel de la nanoescala, el aumento en el área superficial es impresionante. Por ejemplo, si un cubo de cualquier sustancia sólida, con lados de 1 cm y área superficial de 6 cm^2 (0.06 m^2), se divide en cubitos de 10 nm de lado, el área superficial total aumenta 10,000 veces, es decir pasa a ser de 600 m^2 , equivalente a una extensión de $30 \times 20\text{ m}$.

Para entender el efecto del área superficial sobre las propiedades de la materia hay que recordar que las propiedades físicas y químicas de un material sólido en la macroescala, mejor conocido como material voluminoso o *bulk*, son resultado de las interacciones existentes entre los trillones de átomos que conforman a dicho material, aún en masas tan pequeñas como las del orden de miligramos. No obstante, hay una diferencia importante entre los átomos de la superficie del material con respecto a los del interior: los primeros tienen un menor número de interacciones con otros átomos, lo que los hace estar menos fuertemente sujetos (Fig. 7).

El menor grado de conectividad entre los átomos superficiales les ofrece la posibilidad de interactuar con átomos o moléculas en la interfase, al tiempo que les da una mayor libertad de movimiento y mayor propensión a “escapar” de la superficie. En otras palabras, los átomos de la superficie son más reactivos y requieren de la aplicación de menos energía para su movilización. Sin embargo, la cantidad de átomos en la monocapa superficial es infinitamente menor a la cantidad de átomos presentes en todo el *bulk*, por lo que propiedades como la reactividad y los puntos de fusión y ebullición de ese material las determinan las interacciones entre los átomos del *bulk* (Kuncser and Miu, 2014).

Ahora consideremos el caso de una nanopartícula metálica. Una nanopartícula es un conglomerado de unos cuantos átomos, que pueden ser cientos o miles, lo cual depende del tipo de átomo y del tamaño de la nanopartícula; extremadamente pocos si se consideran los trillones que hay en el material *bulk*. En un conglomerado de tan pocos átomos, estos se disponen de tal forma que la mayoría quedan expuestos en la superficie, con menor conectividad entre ellos en comparación a los del *bulk*. Es decir, una nanopartícula está literalmente formada por átomos superficiales (Fig. 7), por lo que estos determinan las propiedades de esa nanopartícula; propiedades que, como ya se mencionó en el párrafo anterior, son diferentes a las del *bulk*. Así, las nanopartículas de oro, por ejemplo, tienen una mayor reactividad y un menor punto de fusión que el oro en *bulk*. Estas son solo dos de tales propiedades, que, aunque simples en apariencia, permiten el desarrollo de dispositivos y materiales innovadores de uso cotidiano.

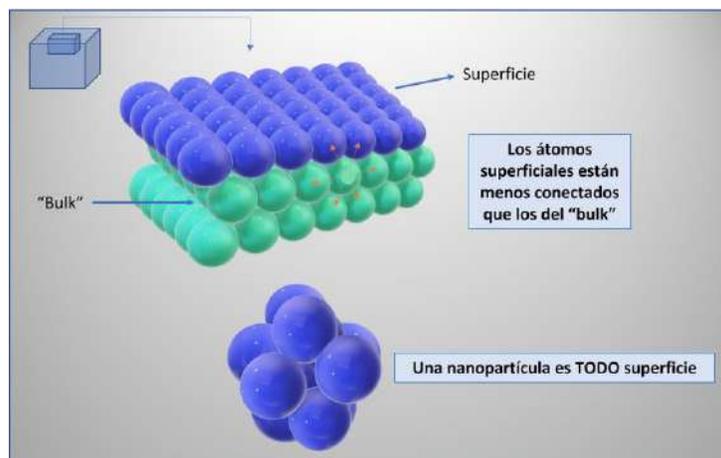


Figura 7. Las propiedades físicas y químicas de la materia son el promedio de los trillones de átomos y moléculas que la componen. Los átomos o moléculas superficiales se comportan diferente a los del *bulk*, por estar menos conectados entre sí. Una nanopartícula está compuesta de pocos átomos, la gran mayoría de los cuales se disponen en la superficie. Por lo tanto, las nanopartículas tienen propiedades superficiales, como una mayor reactividad y menor punto de fusión.

Figure 7. The physical and chemical properties of matter are the average of the trillions of atoms and molecules that compose it. Surface atoms or molecules behave differently from bulk, as they are less connected to each other. A nanoparticle is made up of few atoms, the vast majority of which are arranged on the surface. Therefore, nanoparticles have surface properties, such as higher reactivity and lower melting point.

Una mayor reactividad tiene aplicaciones muy importantes en catálisis (Ishida *et al.*, 2020). Por ejemplo, en los catalizadores que convierten monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂), la reacción se lleva a cabo en un soporte sobre el que se encuentra el metal que cataliza la conversión; la eficiencia catalítica depende en gran medida del área superficial. Bajo este razonamiento, si el soporte se "cubre" con nanopartículas de catalizador, la eficiencia catalítica aumenta cientos de veces no solo por una mayor área superficial sino también porque las nanopartículas son más reactivas.

Por otro lado, la depresión del punto de fusión permite que algunas nanopartículas se utilicen como agentes de relleno en procesos que requieren de temperaturas altas, como el sinterizado de cerámicas o la soldadura de microcircuitos eléctricos. Las cerámicas se fabrican a partir de sólidos secos o lodos hechos de materiales pulverizados, los que se moldean, se secan y se sinterizan a altas temperaturas. El objetivo del sinterizado es hacer un material denso, homogéneo y resistente. Sin embargo, es inevitable la presencia de huecos microscópicos que quitan resistencia mecánica, pues sirven como puntos de partida para la propagación de grietas. Aprovechando la gran área superficial y los bajos puntos de fusión de nanopartículas, se puede sinterizar "en frío" (<200 °C) para no solo obtener cerámicas densas sino también hacer más sostenible el proceso (Guo *et al.*, 2016). En el campo de la electrónica la miniaturización es ya una necesidad y las nanopartículas metálicas encuentran aplicación en la micro o nanosoldadura. Las soldaduras utilizadas en electrónica deben ser libres de plomo, pero sin este elemento la temperatura de fusión de la soldadura se eleva en más de 35 °C, lo cual puede resultar perjudicial para los componentes electrónicos. Una solución es llevar al nivel de nanopartículas la soldadura, para así disminuir su temperatura de fusión (Gao and Gu, 2016).

Propiedades ópticas de las nanopartículas y aplicaciones diferentes a las ornamentales

Las propiedades ópticas de las nanopartículas metálicas son aún más interesantes. En un metal conductor en *bulk*, los electrones fluyen libremente por todo el material al aplicarse un campo electromagnético, como la luz; de hecho, sobre la superficie hay una nube de electrones. Pero en una nanopartícula el tamaño es tan reducido, que ocurre un fenómeno conocido como confinamiento cuántico, equivalente a que los electrones quedan “enjaulados”.

Cuando nanopartículas metálicas, como las de oro o plata, se encuentran dispersas en un líquido, o en un sólido transparente o translúcido como el vidrio, y son expuestas a la luz, el campo electromagnético obliga a los electrones de cada nanopartícula a moverse de un lado a otro dentro de esta, en todas las direcciones.

Este movimiento, al ser oscilatorio, genera una onda de una frecuencia característica que depende del tipo, tamaño y forma de las nanopartículas. Esta frecuencia puede ser detectada como un pico de absorbancia en un espectrofotómetro. La señal se amplifica debido a la gran cantidad de nanopartículas que hay en la dispersión y se manifiesta visualmente en la coloración de esta. Este efecto, que se conoce como resonancia plasmónica superficial o plasmón superficial, es indicativo de la formación de nanopartículas durante el proceso de síntesis y se presenta solo en un rango estrecho de tamaños (2–100 nm). Es decir, no es detectable cuando en la dispersión solo hay átomos metálicos o conglomerados muy pequeños, ni cuando las nanopartículas exceden de un tamaño mayor a 100 nm (Selvemani, 2019).

La absorbancia característica de las nanopartículas de plata es de 420 nm y 550 nm para las de oro. El fenómeno del plasmón superficial explica la variedad de colores en las vidrieras de las catedrales medievales y en la copa de Licurgo, las cuales contienen mezclas de nanopartículas metálicas de diferente tipo y tamaño. Sin embargo, la investigación científica ofrece usos mucho más sofisticados para las nanopartículas metálicas.

Otro tipo de nanopartículas que tienen propiedades ópticas únicas son los puntos cuánticos, también llamados QDots. A diferencia de las nanopartículas de oro y plata, hechas de metales conductores, los QDots se producen a partir de semiconductores, como el selenuro de cadmio. Debido al pequeño tamaño de los QDots (2–6 nm), los electrones están confinados cuánticamente. La naturaleza semiconductor hace que los electrones, en respuesta a la radiación electromagnética, vayan de un estado de mínima energía hasta otro mayor, donde podrían actuar como conductores. Sin embargo, al estar confinados no tienen la posibilidad de fluir como lo harían en el material *bulk*, por lo que regresan a su nivel basal de energía. En ese regreso emiten energía en forma de luz, es decir, son fluorescentes. Una característica muy interesante de los QDots es que el color de la fluorescencia depende del tamaño de la nanopartícula, de tal forma que manipulando el tamaño de esta se logra un espectro de colores de alta pureza, desde el rojo al azul (Cotta, 2020).

Hoy día, tanto el fenómeno del plasmón superficial de las nanopartículas metálicas, como el de fluorescencia de los QDots tienen un gran potencial en el diagnóstico temprano y efectivo de enfermedades (Katas *et al.*, 2018; Badilli *et al.*, 2020). Las nanopartículas en su forma prístina no son muy útiles para estos propósitos; de hecho, su potencial citotoxicidad es una limitante para su uso clínico. Sin embargo, hay maneras de funcionalizarlas o cubrirlas con ciertas moléculas, de tal forma que no solo se vuelvan biocompatibles, sino que tengan la capacidad de reconocer células específicas, como las cancerosas, incluso en las etapas más tempranas del desarrollo de la

enfermedad. En casos como ese es necesario complementar los estudios con técnicas de imagenología para detectar el lugar exacto en donde se encuentran las nanopartículas y, por tanto, las células enfermas. Actualmente se realiza un gran esfuerzo de investigación para que las nanopartículas sean utilizadas no únicamente en el diagnóstico clínico sino también para el transporte de agentes terapéuticos hasta tejidos o células específicas, para evitar así efectos secundarios (Sanità *et al.*, 2020).

Mientras tanto, las nanopartículas metálicas se usan en la industria biomédica como herramientas de diagnóstico rápido *in vitro*. Para esto se saca ventaja de las propiedades ópticas de las nanopartículas para generar señales detectables a la vista, como indicadores de positivo o negativo. Un buen ejemplo es la prueba rápida de embarazo, que se realiza humedeciendo con orina una tira, la cual se encuentra dentro de un dispositivo que es diseñado para tal fin. Sobre la tira están dispersas nanopartículas muy pequeñas de oro, funcionalizadas con anticuerpos de la hormona del embarazo. Al impregnar el dispositivo con orina, si la hormona del embarazo se encuentra presente se fija a las nanopartículas debido a su especificidad por el anticuerpo.

El efecto global es que las nanopartículas pequeñas se aglomeran y forman otras de mayor tamaño, para dar lugar al plasmón superficial. El efecto se nota visualmente: la aparición de una banda roja indica positivo, mientras que en ausencia de la hormona del embarazo se produce una coloración verdosa, señal de negativo (Dykman and Khlebtsov, 2011). Hay que mencionar que los inmunoensayos ya existían desde antes de la nanotecnología, de hecho, el oro coloidal se utilizaba para algunas aplicaciones, incluyendo la prueba de embarazo, pero hoy día los métodos se han optimizado mediante el uso de nanopartículas y anticuerpos monoclonales.

Las nanopartículas metálicas también ejercen acción bactericida. Desde hace mucho tiempo la plata coloidal se utiliza como antiséptico. No obstante, el efecto bactericida de las nanopartículas es mayor debido a una mayor reactividad (Zhang *et al.*, 2016). Esta propiedad ha dado la pauta para el uso de las nanopartículas de plata en artículos de uso cotidiano y en situaciones donde se requiere de un ambiente aséptico, por ejemplo calcetas deportivas, equipos de purificación de aire, recubrimientos para paredes y pisos de hospitales, etc.

Producción de nanopartículas

Podría pensarse que la obtención y manipulación de nanopartículas requiere de métodos de reducción de tamaño y de equipo altamente especializado, lo cual es parcialmente cierto. Aunque muchas nanopartículas se pueden producir utilizando el equipamiento de un laboratorio de química convencional, la caracterización de forma, tamaño, área superficial y otra serie de propiedades sí requiere de equipos más especializados, como el microscopio electrónico, al menos. La sofisticación depende en gran medida de las aplicaciones que se pretendan. Por otro lado, en un gran número de casos no es necesario reducir de tamaño, pues es posible fabricar nanopartículas mediante métodos llamados “bottom-up”, es decir, mediante el ensamblado espontáneo de átomos y moléculas, lo cual se puede lograr por métodos fisicoquímicos. Algunos ejemplos de esto se describen a continuación, a grandes rasgos.

Para producir nanopartículas de plata, simplemente se mezclan proporciones adecuadas de dos soluciones, una conteniendo los átomos de plata, como el nitrato de plata, y otra con un agente reductor, como el citrato de sodio. El citrato neutraliza las cargas positivas de los átomos de plata,

lo que propicia que estos se aglomeren mediante atracciones de Van der Waals para formar pequeños racimos. En la medida que transcurre la reacción, estos aglomerados crecen hasta formar nanopartículas de tamaño homogéneo.

El tamaño deseado de las nanopartículas se logra deteniendo la aglomeración mediante la adición de algún compuesto químico que estabilice el sistema e impida la interacción de unas nanopartículas con otras; en ocasiones el mismo agente reductor, como el citrato, actúa como estabilizador. Finalmente, las nanopartículas se recuperan por filtración y se secan, quedando listas para su funcionalización, dependiendo de la aplicación deseada (Zhang *et al.*, 2016). En este proceso la reacción se inicia a alta temperatura, pero esta se omite utilizando agentes reductores fuertes, como el borohidruro de sodio. Este último reactivo es muy corrosivo y hace riesgosa su manipulación, por lo que actualmente existe la tendencia de encontrar agentes reductores fuertes, de origen natural, que hagan más sustentables los procesos de síntesis de nanopartículas de plata y oro.

Los nanotubos de carbono, por otro lado, se fabrican sometiendo a altas temperaturas algún material carbonáceo, el cual puede ser sólido, como el grafito, o líquido, como algún solvente orgánico. El proceso se realiza dentro de un horno diseñado especialmente, donde los materiales se vaporizan debido a la alta temperatura y los átomos de carbono se alinean e interaccionan unos con otros, de tal forma que se producen las estructuras típicas de los nanotubos. Estos se depositan sobre las superficies del interior del horno, de donde hay que recuperarlos mediante raspado una vez terminado el proceso. Si sobre una de las superficies internas del horno se dispersan intencionalmente nanopartículas de un metal catalizador, se forman nanotubos de carbono de una sola capa, cuyo diámetro dependerá del tamaño de las nanopartículas metálicas. Si no se adiciona el catalizador, se obtienen mayormente nanotubos de carbono multicapa, de diámetro variable (Eatemadi *et al.*, 2014).

La fabricación de nanopartículas de origen biológico, como las derivadas de proteínas, es también un proceso “bottom-up”, espontáneo y relativamente fácil de realizarse ya que no requiere de equipos super especializados, además de que ocurre a temperaturas cercanas a la del ambiente. Una estrategia es la hidrólisis enzimática para liberar péptidos específicos, los cuales actúan como bloques moleculares que posteriormente se ensamblan espontáneamente para formar nanopartículas proteicas.

La forma y tamaño de las nanopartículas depende de la proteína y enzima utilizadas. Como las proteínas tienen una gran diversidad estructural, se puede lograr una infinidad de formas, como nanoesferas, nanotubos y nanovesículas, así como aprovechar los grupos funcionales presentes en las mismas para aplicaciones muy específicas.

La compleja estructura química de las proteínas puede también ocasionar un ensamble descontrolado, que resulta finalmente en precipitación. Esto se puede evitar mediante la adición de grupos funcionales que estabilicen a las nanopartículas ya formadas. Debido a su biocompatibilidad y tamaño, así como a las propiedades funcionales de emulsificación y formación de geles, las nanopartículas proteicas tienen un gran potencial en las industrias alimentaria y farmacéutica como transportadores de fármacos y compuestos bioactivos (Bourbon *et al.*, 2019). Hay una clase de proteínas, las albúminas, que tienen una afinidad natural por las células cancerosas. Esta propiedad las hace candidatas para la preparación de nanopartículas cargadas con

fármacos, para dirigir estos directamente a las células tumorales y así evitar los efectos secundarios de los tratamientos convencionales (Hong *et al.*, 2020).

Propiedades de la nanoescala para la manufactura de productos novedosos

Para aplicaciones relacionadas con propiedades mecánicas u otras, se preparan nanocompuestos. Un nanocompuesto es un material sólido que consiste en varias fases, al menos una de las cuales tiene una, dos o tres dimensiones de tamaño nanométrico. La fase o fases nanométricas pueden ser nanopartículas, nanofibras o nanoarcillas y se dispersan dentro de una matriz metálica, cerámica o polimérica (Omanović-Miklićanin *et al.*, 2020).

Un nanocompuesto de matriz metálica consiste en una fase metálica (o de aleaciones), como aluminio, hierro, magnesio, estaño y plomo, la cual se refuerza con un material nanométrico para darle mejores propiedades de ductilidad, tenacidad, así como de resistencia mecánica y a las altas temperaturas. Los nanocompuestos metálicos tienen aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz.

Por otro lado, las cerámicas convencionales tienen el problema de fragilidad y propensión a la fractura, debido a la propagación de grietas. Los nanocompuestos de matriz cerámica resuelven en gran medida este problema porque la matriz se refuerza con una nanofase metálica dúctil, que le otorga una mayor durabilidad y resistencia mecánica. Los nanocompuestos cerámicos encuentran aplicaciones en amplios sectores de la industria, desde la aeroespacial y automotriz, hasta la militar y biomédica. Respecto a esta última, las biocerámicas representan un gran potencial para desarrollar una nueva generación de implantes y prótesis, ya que no solo se pueden mejorar las propiedades mecánicas, sino que el efecto se puede combinar con propiedades bioactivas para reducir el riesgo de rechazo y/o aumentar la proliferación de células regeneradoras de hueso.

Los nanocompuestos de matriz polimérica consisten en una fase polimérica en la que se dispersa algún relleno o *filler*. Los *fillers*, más correctamente llamados *nanofillers*, para este caso, pueden ser nanotubos de carbono, nanopartículas metálicas, nanoarcillas y muchos otros. A nivel molecular se dan interacciones entre el polímero y el *nanofiller*, lo que resulta en un cambio en las propiedades del material, entre las que se incluye una alta estabilidad térmica, así como mejores propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases (Omanović-Miklićanin *et al.*, 2020).

La industria electrónica es uno de los mejores testigos de lo que se puede lograr mediante la nanotecnología. El desarrollo de pantallas de última generación utiliza tecnología con base en QDots, ya que estos proporcionan colores de alta pureza, con lo que se obtiene una resolución excelente. Igualmente, la alta conductividad eléctrica de los nanotubos de carbono y el grafeno, además de otras propiedades de este último, como la transparencia y ductilidad, los hace excelentes para aplicaciones en electrónica. No está muy lejos el día en que se comercialicen computadoras y pantallas “enrollables”.

Los nanotubos de carbono también se utilizan en nanocompuestos para fabricar artículos deportivos y automotrices, más resistentes y ligeros que los convencionales. En el envasado de alimentos, las cubiertas que están en contacto con estos pueden contener nanomateriales que les otorgan propiedades innovadoras, como actividad antimicrobiana y antioxidante, indicación de la presencia de microorganismos patógenos, permeabilidad controlada a los gases y al agua, registro

del historial de temperaturas, etc. Incluso es posible elaborar envases multifuncionales e inteligentes, es decir que contengan más de un componente nanotecnológico y que cada uno de ellos lleve a cabo acciones específicas en respuesta a cambios en el ambiente circundante (He *et al.*, 2020).

Las telas para la fabricación de prendas de vestir repelentes al agua y la suciedad se tejen con hilos previamente impregnados con nanopartículas de sílice, para darles la propiedad de hidrofobicidad (Wei *et al.*, 2020). Algunas preparaciones farmacéuticas y cosméticas se hacen en forma de nanoemulsiones, donde los compuestos sensibles se encapsulan dentro de las gotas nanométricas de la emulsión. Esto último tiene la ventaja de proteger a los compuestos bioactivos mediante su encapsulación, además de hacer sensorialmente atractivos a los productos.

La imitación de la Naturaleza como herramienta poderosa para la innovación

Algunos de los desarrollos nanotecnológicos están inspirados en nanoestructuras naturales. Tomemos como ejemplos el *efecto loto* y el *efecto geco*. La planta de loto es conocida por crecer en zonas pantanosas y sin embargo siempre permanecer limpia. Un análisis microscópico de la superficie de las hojas de loto revela la presencia de cristales de cera de dimensiones nanométricas. La cera en las hojas de las plantas es normal, es un material de naturaleza lipídica que proporciona características hidrofóbicas a la superficie, es decir, repele el agua. No obstante, el tamaño nanométrico de las estructuras cerosas en las hojas de loto es lo que explica por qué estas se autolimpian constantemente.

El área de contacto entre las gotas de agua (condensadas del ambiente) y los nanocristales de cera de la superficie, es extremadamente pequeña. A esto se le conoce como superhidrofobicidad y ocasiona que las gotas rueden espontáneamente a la menor inclinación, arrastrando consigo cualquier resto de suciedad. Al fenómeno en conjunto se le llama *efecto loto* y su imitación se aprovecha para la manufactura de pintura para superficies autolavables, así como para la fabricación de telas repelentes al agua y la suciedad (Wei *et al.*, 2020).

Existe otro fenómeno conocido como *efecto geco*, que explica la capacidad de los gecos y de muchos insectos y artrópodos de caminar sobre cualquier superficie plana o inclinada, incluso sobre vidrio. La razón es que las patas de los gecos están cubiertas de fibras nanométricas en forma de espátula, cada una de las cuales tiene ancho y largo de 200 nm y 20 nm de grosor. Cada espátula, al estar en contacto con una superficie, experimenta atracción hacia esta por medio de fuerzas de Van der Waals, las cuales son un tipo de interacción electrostática. Estas interacciones son de las más débiles conocidas, pero el conjunto de millones de espátulas (entre 50 y 500 millones en cada almohadilla de cada dedo) hace crecer la fuerza de atracción a tal grado que se soporta el peso del geco y este se mantiene firme sobre cualquier superficie (Greiner, 2010).

El estudio del *efecto geco* fue la inspiración para desarrollar nanopartículas que se utilizan como aditivos para concreto, con la finalidad de promover una mayor adhesión entre partículas, lo que resulta en una mayor resistencia mecánica debido a la baja probabilidad de fisuras o grietas. Estudiar el *efecto geco* también ha permitido una mejor comprensión de los fenómenos superficiales, por lo que hoy existe el potencial de desarrollar productos de interés en biomedicina, por ejemplo adhesivos fibrilares que replacen la sutura y las grapas quirúrgicas.

Conclusiones y perspectivas

El presente artículo aborda, de forma general, diferentes aspectos relacionados con las propiedades, producción y aplicaciones de nanomateriales. La discusión dista mucho de ser exhaustiva, ya que cada sección merece una revisión completa. Igualmente, se dan algunos ejemplos que, a juicio de los autores, pueden ayudar a introducirse en el tema, pero existe una enorme cantidad de otras propiedades y aplicaciones. No se trataron cuestiones de seguridad, por ser de demasiada amplitud, sin embargo, se puede comentar que los organismos reguladores de diferentes regiones del mundo están trabajando arduamente en este sentido.

Muchos de los nanomateriales son inocuos, ya sea por su origen biológico o porque ya están clasificados como seguros. Aquellos para los que existen dudas razonables, se está llevando a cabo la investigación pertinente para garantizar su seguridad antes de lanzarlos al mercado. Aquí cabe aclarar que algunas de las aplicaciones son potenciales, aún se encuentran en la etapa de experimentación, sobre todo las que involucran el introducir nanomateriales en el cuerpo humano.

La nanotecnología es una disciplina emergente que está revolucionando todas las áreas de la industria. En estos tiempos en que la sostenibilidad es un requerimiento urgente, la nanotecnología puede ser una alternativa en la resolución de problemas ambientales, de seguridad alimentaria y de salud. Los detractores de la nanotecnología o los medios de comunicación poco serios pueden influir negativamente en la aceptación de los productos nanotecnológicos e incluso causar pánico, por lo que existe el reto de proporcionar información objetiva. También se reconoce que, aunque una variedad de los nanomateriales es inocua debido a su origen biológico, hace falta investigación para responder a diversas interrogantes en lo que concierne a la seguridad. Por último, la Naturaleza es ejemplo de nanoestructuras funcionales perfectas, de manera que imitarla seguramente resultará en mayores innovaciones y en un planeta sostenible.

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por el financiamiento del proyecto A1-S-40197 de la Convocatoria de Ciencia Básica 2017-2018.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

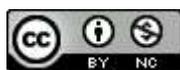
- ACS (2010). Recuperado de American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. Discovery of Fullerenes. (Acceso el 28 de septiembre 2021). <https://bit.ly/3s9YtLz>
- Allan, J., Belz, S., Hoeveler, A., Hugas, M., Okuda, H., Patri, A., Rauscher, H., Silva, P., Slikker, W., Sokull-Kluettgen, B., Tong, W., & Anklam, E. (2021). Regulatory landscape of nanotechnology and nanoplastics from a global perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104885>.

- Badilli, U., Mollarasouli, F., Bakirhan, N.K., Ozkan, Y., Ozkan, S.A. (2020). Role of quantum dots in pharmaceutical and biomedical analysis, and its application in drug delivery. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116013. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116013>.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(1), 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch., & Weibel, E. (1982). Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical Review Letters*, 49(1), 57–61. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.57>
- Binnig, G., Quate, C.F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9), 930-933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- Borisenko, V. E., & Ossicini, S. (2008), What is What in the Nanoworld. A Handbook on Nanoscience and Nanotechnology. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527623334>
- Bourbon, A. I., Pereira, R. N., Pastrana, L. M., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (2019). Protein-based nanostructures for food applications. *Gels (Basel, Switzerland)*, 5(1), 9. <https://doi.org/10.3390/gels5010009>
- Camarillo-Abad, E., Blome-Fernández, R., Castellanos-Andrade, P. I., & Campos Delgado, J. (2019). Mitos y realidades de la nanotecnología en México. *Mundo Nano*, 12(22), 1e-16e. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.65023>
- Cotta, M. A. (2020). Quantum dots and their applications: What lies ahead? *ACS Applied Nano Materials*, (6), 4920-4924. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01386>
- Dhapte, V., & Pokharkar, V. (2019). Nanosystems for Drug Delivery: Design, Engineering, and Applications. In *Micro and Nano Technologies, Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles* (pp. 321-345). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00013-7>
- Dykman, L. A., & Khlebtsov, N. G. (2011). Gold nanoparticles in biology and medicine: Recent advances and prospects. *Acta Naturae*, 3(2), 34–55. <https://bit.ly/3OUDyWH>
- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y., & Joo, S. W. (2014). Carbon nanotubes: Properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 393. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393>
- He, H., Pham-Huy, L. A., Dramou, P., Xiao, D., Zuo, P., & Pham-Huy, C. (2013). Carbon nanotubes: Applications in pharmacy and medicine", *BioMed Research International*, 2013, Article ID 578290. <https://doi.org/10.1155/2013/578290>
- Feynman, R. P. (1961). There's Plenty of Room at the Bottom. In *Miniaturization* (pp. 282–296). Reinhold.
- Gao, F., & Gu, Z. (2016). Melting Temperature of Metallic Nanoparticles. In *Handbook of Nanoparticles*, (pp. 661–689). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15338-4_6
- Greiner, C. (2010). Gecko-Inspired Nanomaterials. In *Nanomaterials for the Life Sciences Vol.7: Biomimetic and Bioinspired Nanomaterials*. (pp. 1–39), Wiley–VCH. <https://bit.ly/3FfYmDQ>
- Guo, H., Baker, A., Guo, J., & Randall, C.A. (2016). Protocol for ultralow-temperature ceramic sintering: An integration of nanotechnology and the cold sintering process. *ACS Nano*, 10 (11), 10606–10614. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b03800>
- He, X., Deng, H., Hwang, H. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27, 1 – 21. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>

- Hong, S., Choi, D. W., Kim, H. N., Park, C. G., Lee, W., & Park, H. H. (2020). Protein-based nanoparticles as drug delivery systems. *Pharmaceutics*, 12(7), 604. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070604>
- Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., Konno, H. (2014). Graphene: Synthesis and Preparation, In *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon*, (pp. 41-65), Butterworth-Heinemann, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407789-8.00003-X>
- Katas, H., Moden, N.Z., Lim, C.S., Celesistinus, T., Chan, J.Y., Ganasan, P., Suleman, S., & Abdalla, I. (2018). Biosynthesis and potential applications of silver and gold nanoparticles and their chitosan-based nanocomposites in nanomedicine. *Journal of Nanotechnology*, 2018, Article ID 4290705. <https://doi.org/10.1155/2018/4290705>
- Kuncser, V., & Miu, L. (2014). *Size Effects in Nanostructures, Basics and Applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44479-5>
- Loos, M. (2015). *Nanoscience and Nanotechnology*. In *Carbon Nanotube Reinforced Composites* (pp. 1-36). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00001-1>
- Nanowerk (2021). https://www.nanowerk.com/metric_prefixes_table.php
- Omanović-Miklićanin, E., Badnjević, A., Kazlagic, A., & Hajlovac, M. (2020). Nanocomposites: A brief review. *Health and Technology*, (10), 51-59. <https://doi.org/10.1007/s12553-019-00380-x>
- Reibold, M., Paufler, P., Levin, A., Kochmann, W., Pätzke, N., & Meyer, D. C. (2006). Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature*, 444, 286. <https://doi.org/10.1038/444286a>
- Sanità, G., Carrese, B., & Lamberti, A. (2020). Nanoparticle surface functionalization: How to improve biocompatibility and cellular internalization. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, Article 587012. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.587012>
- SciDevNet Noticias (2011) <https://bit.ly/3w43B5h>
- Selvamani, V. (2019). *Stability Studies on Nanomaterials Used in Drugs*. In *Micro and Nano Technologies, Characterization and Biology of Nanomaterials for Drug Delivery*. (pp. 425-444). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814031-4.00015-5>
- Wei, D. W., Wei, H., Gauthier, A. C., Song, J., Jin, I., & Xiao, H. (2020). Superhydrophobic modification of cellulose and cotton textiles: Methodologies and applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.001>
- Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
- Zhang Chengke, Wu Licun, de Perrot Marc, Zhao Xiaogang. (2021). Carbon nanotubes: A summary of beneficial and dangerous aspects of an increasingly popular group of nanomaterials. *Frontiers in Oncology*, 11, 2908. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.693814>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>