

Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales

The abyss between the properties of micromaterials and nanomaterials

Gerardo A. Rosas Trejo

Para citar este artículo: Gerardo A. Rosas Trejo, 2022. El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales. Ciencia Nicolaita no. 85, 17-26. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.618>



Historial del artículo:

Recibido: 18 de abril de 2022

Aceptado: 15 de agosto de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: grtrejo@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

El abismo entre las propiedades de los micromateriales y nanomateriales

The abyss between the properties of micromaterials and nanomaterials

Gerardo A. Rosas Trejo

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales. Edificio U, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México.

Resumen

El desarrollo científico de los materiales ha estado a la vanguardia del desarrollo tecnológico en muchos campos de la ciencia, como la electrónica, la catálisis, el medio ambiente y ahora la medicina, entre otros. Durante el conocimiento básico de los materiales aparecen nuevas propiedades, conceptos y leyes que los rigen, encontrando prácticamente nuevas opciones para cualquier aplicación del desarrollo actual. Los nanomateriales abren una auténtica brecha en este campo debido a la gran diferencia de sus dimensiones con respecto a los micromateriales, acercándonos al control y manipulación de los átomos en el sólido, lo que sin duda permite ajustar sus propiedades y aplicaciones. Este artículo trata sobre algunas diferencias en las propiedades existentes entre la microtecnología representada por los micromateriales y la nanotecnología impulsada por los nanomateriales.

Palabras Clave: Microtecnología, nanotecnología, micromateriales, nanomateriales, estructura.

Abstract

Scientific materials development has been at the forefront of technological development in many fields of science, such as electronic, catalysis, environment, and now medicine, among others. During the basic knowledge of materials, new properties, concepts, and laws governing them have been known, therefore new options for any application of the current development. Nanomaterials open a genuine gap in this knowledge field due to the significant differences about dimensions concerning micromaterials, bringing us closer to the control and manipulation of atoms in the solid, which undoubtedly allows the adjustment of their properties and applications. This article deals some differences between microtechnology represented by the micromaterials and nanotechnology driven by the nanomaterials.

Keywords: Microtechnology, nanotechnology, micromaterials, nanomaterials, structure.

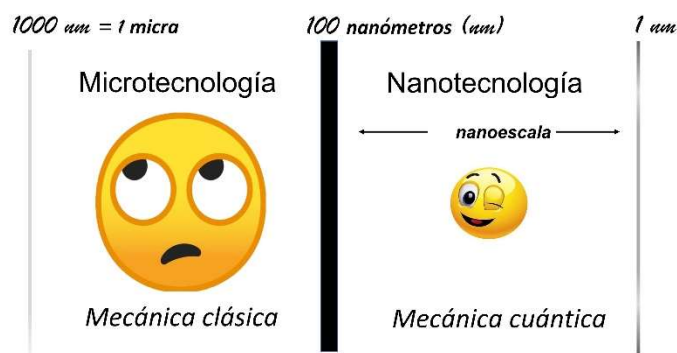


Figura 1. La línea que divide las características entre los micromateriales y nanomateriales.

Introducción

Con el desarrollo de la nanociencia y nanotecnología se abre una gran brecha natural en el estudio del estado sólido, que separa a los campos existentes entre los micromateriales y los nanomateriales. Se trata de una gran línea divisoria trazada por el desarrollo científico, marcada por la aguda diferencia de dimensiones y el cambio en las leyes que rigen las propiedades entre aquellos sólidos micrométricos y nanométricos (Figura 1). Propiedades, conceptos, formas de investigar y desarrollo del conocimiento, distinguen este abismo en el campo. La visión de esta brecha conceptual justo establece la comprensión entre las diferencias entre el comportamiento de la mecánica clásica y la mecánica cuántica (Kulkarni *et al.*, 2015). Esta gran brecha también separa o separará como siempre, a los países desarrollados de los emergentes.

Las llamadas nanociencias y nanotecnologías se encuentran relacionadas con muchas áreas del conocimiento, entre las que se encuentran las ciencias básicas, la electrónica, medio ambiental y la ciencia de los materiales (Roco *et al.*, 1999). Debe notarse que conceptualmente, en el estado sólido al hablar de las ciencias básicas se decía; matemáticas por ahí, física por acá, química más allá, biología, etc. No obstante, ahora en la nanociencia todas ellas se juntan para explicar los fenómenos que suceden en esta escala (Figura 2).

Con el desarrollo en el campo de la ciencia de los nanomateriales, no se presenta ningún cambio en los métodos de estudio, se espera encontrar nuevas y sobresalientes propiedades en cada nuevo material, ya que siempre han influido en el desarrollo tecnológico de muchas áreas, donde también algunas aplicaciones novedosas surgen día con día. Esta tendencia

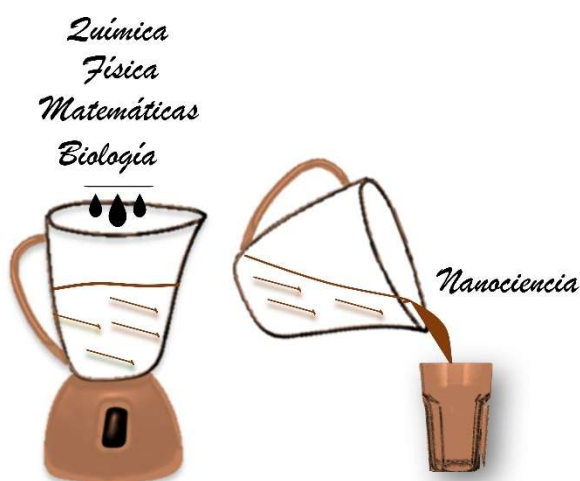


Figura 2. El gran conjunto de las ciencias básicas contribuyendo en la nanotecnología.

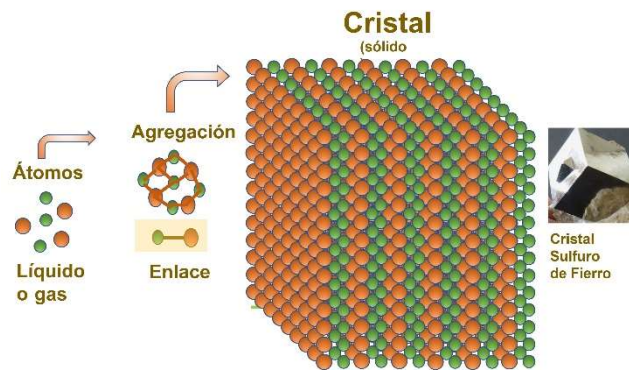


Figura 3. Agregación de los átomos para formar el cristal.

es una buena razón para que la nanociencia y la nanotecnología sean una sobresaliente área de exploración, innovación e inversión.

Cristales, el estado más común de agregación de átomos en la materia

Hagamos referencia a esas propiedades que marcan el desarrollo tecnológico en esta área. Comenzaremos por algo básico, recordar qué es un cristal. Un cristal es el estado más frecuente de agregación de la materia (los átomos), o bien los átomos se unen repetitivamente para formar el cristal (Figura 3). Como consecuencia del empaquetamiento repetitivo de esos átomos en el cristal, exhibirán propiedades de simetría, como caras planas y aristas bien rectas, como lo apreciamos en el cristal natural de sulfuro de hierro que aparece en la Figura 3.

Ahora bien, si observamos bajo un microscopio un fragmento de una mesa metálica o de un cuchillo de

mesa, lo más seguro es que descubramos los cristales que los componen (ver Figura 4a, cada segmentito es un cristal). Gran parte del estado sólido está representado por la integración de estos cristales, por ejemplo, la tierra, los metales, algunos plásticos, etc. Se debe hacer mención que los cristales cuando se encuentran como individuos (no como en el ejemplo del cuchillo mencionado) se desarrollan alcanzando un orden y simetría atómica, adoptando alguna forma simétrica, por ejemplo, cúbica (Figura 4b), en donde su característica inherente, son sus múltiples caras o planos y ejes de simetría.

En el ejemplo del cuchillo o de la mesa no se desarrollan esas características del cristal individual, porque cuando crecen todos juntos, cada uno representa un obstáculo para los demás, frenándose ese crecimiento entre todos y como consecuencia se presenta una interfase entre ellos llamada frontera cristalina (representada por la línea azul en la Figura 4a). Por tanto, en el proceso metalúrgico, donde muchos

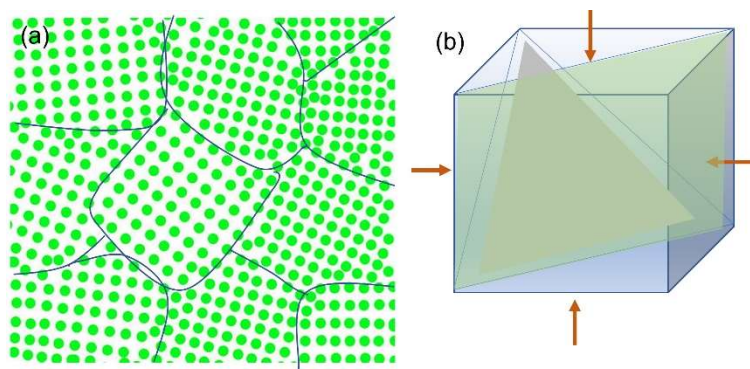


Figura 4. (a) Arreglo microscópico de los cristales en cualquier sólido metálico fabricado. Las líneas azules representan las fronteras entre los cristales crecidos, es en realidad el tope de crecimiento de cada cristal impedido por otros cristales, b) Forma cúbica de un cristal individual crecido, las flechas indican las diferentes caras de ese cristal. La forma individual de un cristal en su mínima expresión de volumen es llamada celda unitaria de ese cristal, la cual es extremadamente pequeña y se reproduce infinitamente en los ejes X, Y y Z formando el cristal crecido. Obviamente sino hubiera fronteras el cristal estaría mostrando esas facetas que se muestran con las flechas en esta figura, empero, habiendo fronteras el cristal es irregular en la periferia como se muestra en el inciso (a).

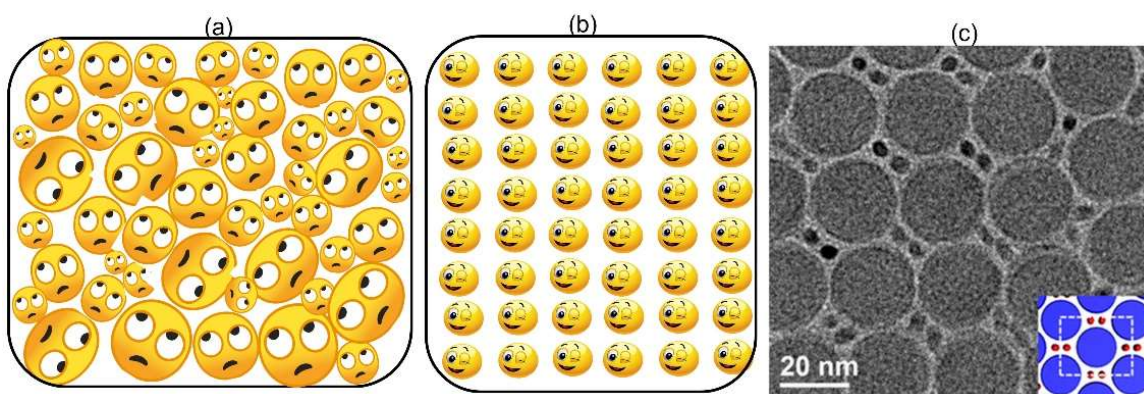


Figura 5. Analogía de la diferencia en la distribución de los cristales entre (a) un sólido micrométrico, se muestra en forma de caras a los cristales representativamente que se encuentran desorientados en un sólido micrométrico, tienen diferencias en tamaño y están en contacto por causa de la existencia de la frontera de grano. (b) sólido nanométrico, en el nanomaterial, los cristales por ser individuos se logran orientar en la misma dirección, lo cual permite aprovechar al máximo sus propiedades anisotrópicas, no existen fronteras entre los cristales (no se tocan entre ellos), pero existen interfaces invisibles (surfactantes o substratos) que permiten mantener esa orientación entre los cristallitos, además, esos cristales cuentan con el mismo tamaño y forma. (c) imagen real de una red ordenada de nanocristales (8).

cristales crecen juntos, esto impedirá que se desarrolle la figura geométrica que caracteriza a los cristales individuales.

En realidad, el que tenga muchas caras el cristal se debe a que, en alguna vista simétrica del mismo (o cara), encontramos diferente cantidad y tipo de átomos que la constituyen. Es decir, cada cara tiene una densidad de átomos diferente, y no será lo mismo, medir esa propiedad cualquiera, por ejemplo, eléctrica, magnética, óptica o mecánica, a lo largo de cada cara del cristal, pues tendrán valores distintos, o sea que cada cara del cristal es única enfrente de esa propiedad, esto es llamado la anisotropía de los cristales.

Cristales en un sólido micrométrico

Imaginemos en una analogía de la figura 4a, que representamos de manera didáctica mediante la Figura 5a, el arreglo en que se encuentran los microcristales en un sólido, que es parte de la microtecnología, en donde, cada cara representa un microcristal. Se forman núcleos y crecen unidos, compartiendo parte de su superficie en su periferia. Como consecuencia, se pueden presentar diferentes tamaños, formas y se ubican relativamente desorientados entre ellos. Esto evita aprovechar al máximo desde el punto de vista físico o químico sus características anisotrópicas, ya que todos orientados en distintas caras, no podrán ofrecer su mejor valor en la dirección

que se aplique tal propiedad, sino que habiendo muchas caras desorientadas, el valor de esa propiedad será un promedio de los valores de todas las caras, lo que puede representar un desaprovechamiento en las propiedades de los cristales derivado del orden micrométrico que subyace a los micromateriales (ver figura 5a).

Cristales en un sólido nanométrico

Ahora bien, en los llamados nanomateriales al ser individuos esenciales *per se*, estos varían en apariencia y se configuran como el caso de la figura 5b. Cuando se fabrican los monocristales en un nanomaterial, pueden orientarse en alguna dirección preferente controlando el tamaño y posición para aprovechar al máximo sus propiedades anisotrópicas.

Esencialmente es como si se tratase de un material monocristalino, en el cual cada nanocristal (análogamente representado por cada cara), se encuentra bien dimensionado y ubicado en el espacio integrando el nanomaterial, efectivamente es un estado periódico en X, Y, y Z en el que encontramos a los nanocristales, semejante al arreglo periódico en el que se encuentran los átomos del cristal. En este campo se presentan los conceptos y tecnologías de crecimiento de nanocristales tales como: nanotecnología ordenada, ensamblado o autoensamblado, en donde la competencia es actualmente, adelantada, vigorosa y persistente (Tritschler *et al.*, 2015).

Nanoestructuras

Se considera una nanoestructura, todo aquel individuo o cristal, que contenga alguna de sus dimensiones en el estado nano, es decir menor a 100 nm. En ese sentido se expresa una clasificación muy importante existente entre los nanomateriales (Sun *et al.*, 2017). Los nanomateriales están formados de cristales tan pequeños que literalmente, los átomos se pueden contabilizar en ellos (Thompson *et al.*, 2002). En un sólido a esta escala, las propiedades comienzan a cambiar drásticamente debido a los efectos cuánticos; por ejemplo, la atracción de la gravedad desaparece; los nanosólidos se mantienen suspendidos en solución (Nagarajan *et al.*, 2008). En otro ejemplo, un metal puede ahora comportarse como semimetal (Kannan *et al.*, 2021).

Algunas propiedades físicas de los nanomateriales

Una característica fascinante de los nanomateriales es la ajustabilidad de sus propiedades, en donde al cambiar las dimensiones de la partícula, las propiedades del mismo sólido pueden ser manipuladas de acuerdo con el interés. Por ejemplo, en un semiconductor cambia la emisión de la luz con el tamaño del nanocristal (color de la fluorescencia), lo que al mismo tiempo puede utilizarse para identificar a la partícula como marcador en varios propósitos (Khan *et al.*, 2019). Además, habrá también cambios drásticos entre otros materiales. Por ejemplo, el carbón que todos conocemos por ser muy ligero y quebradizo se comporta de manera opuesta en el estado

nano (Eatemadi *et al.*, 2014), en donde el conjunto de sus enlaces atómicos contenidos en el cristal, se pueden doblar extremadamente como lo hace el pesado acero inclusive superando sus propiedades mecánicas (Figura 6). Otro efecto cuántico en la nanoescala se conoce como "túnelaje" o efecto túnel, que es el fenómeno que permite, bajo forma de accesorio, el funcionamiento de los microscopios electrónicos modernos de transmisión y de barrido, así como en las memorias flash que se utilizan en computación (Rabouw *et al.*, 2017).

Similarmente, debido a la reducción excesiva de tamaño de partícula entre 1-100 nm, el área superficial se incrementa drásticamente, en donde la proporción de átomos encontrados en la superficie al interior aumenta, al grado de cambiar las propiedades fisicoquímicas del sólido. Por ejemplo, el punto de fusión disminuye progresivamente y al mismo tiempo, la disponibilidad electrónica afecta la reactividad. Así las propiedades superficiales dominan en el nanomaterial (Girard *et al.*, 2011).

Desde hace alrededor de tres décadas en el campo de estudio de los nanomateriales, se acumula una gran investigación en donde, una amplia colección de diferentes formas, tamaños y configuraciones de nanomateriales se han desarrollado (Biswas *et al.*, 2005). A través de estos años, se expone el arte de controlar todos los aspectos físicos del cristal, contrario a lo que sucede en la microtecnología; lo cual evidentemente está relacionado con la manipulación de los átomos en esta escala (Barhoum *et al.*, 2022). Así el control de los procesos de síntesis y preparación de estos materiales se ha vuelto cada vez más

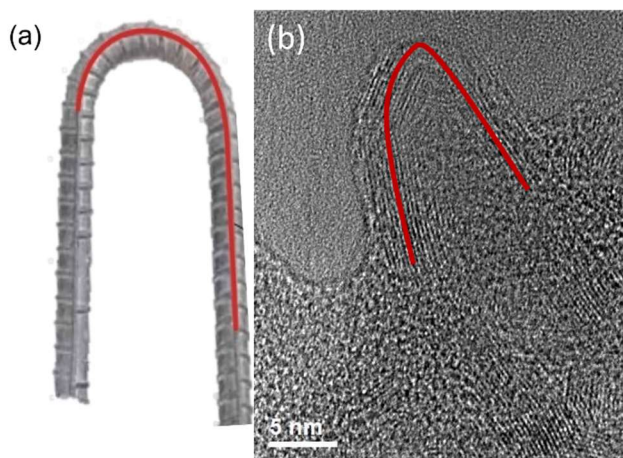


Figura 6 Átomos adoptando la forma de U en (a) nanotubo de carbón y (b) varilla de hierro (Patiño-Carachure *et al.*, 2020).

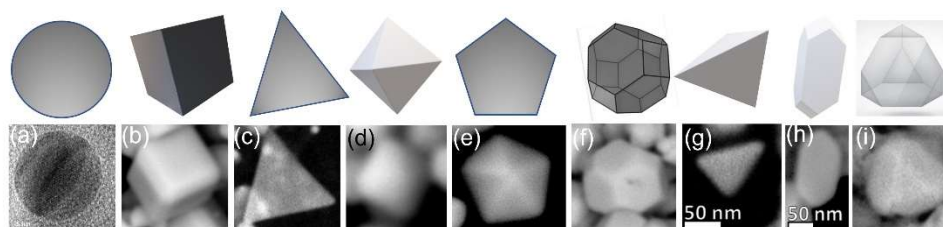


Figura 7. Diferentes formas sólidas de nanopartículas sintetizadas: a) esféricas (Landeros *et al.*, 2018), b) cúbicas (Aguilar *et al.*, 2019), c) triangulares (Herrero-Calvillo *et al.*, 2020 y Vidales *et al.*, 2017), d) octaédricas (Aguilar *et al.*, 2019), e) decaédricas (Mares-Briones *et al.*, 2017), f) cubo-octaédricas (Aguilar *et al.*, 2019), g) tetraédricas (Mares-Briones *et al.*, 2017), h) tetragonal deuteroprisma (Mares-Briones *et al.*, 2017) e i) tetraedro truncado (Aguilar *et al.*, 2019).

exigente y los resultados son en verdad ¡sorprendentes! Aunque los nanomateriales son utilizados también en forma desordenada, es decir, en donde sus dimensiones y posición dentro del sólido no son tan importantes en lo que es llamada la nanotecnología simple, aunque el manipular la formación de estos sólidos sigue siendo exigente.

Diversidad de nanomateriales

Las clasificaciones de los nanomateriales abundan. Solo en el campo de las nanopartículas (NPs) llamadas nanomateriales cero-dimensionales, se clasifican de acuerdo con la composición del material que la conforma: poliméricas, cerámicas, metálicas, de carbón, e híbridas (Chin *et al.*, 2022). Referente a su estructura pueden ser, de múltiple macla, macla simple, deformadas o cúbicas centradas en las caras (Esparza *et al.*, 2007). Con respecto a su forma las NPs pueden ser esféricas, cuadradas, octaedros, cubo-octaedros y huecas en cada una de las formas anteriores. Para darnos una idea de estas partículas algunos ejemplos se presentan en la Figura 7a-i, en donde en la parte superior aparece un esquema y en la inferior una imagen microscópica de cada una de ellas.

No obstante, un gran desarrollo en el estudio actual en este campo, son las NPs de configuración híbrida, en donde se encuentra que éstas se componen de dos o más tipos de nanopartículas. Aquí se ubican las NPs núcleo-coraza, núcleo con múltiple coraza, tipo mancuerna, frambuesa y parchadas, que pueden encontrarse en diferentes formas, sólidas y huecas (Figura 8). Estas partículas híbridas son el desarrollo más reciente que llama la atención, debido a sus múltiples funciones que pueden ejercer de acuerdo con la composición química y también a sus diferencias en forma, además del aumento en su área superficial.

En estas partículas hay verdaderamente una variedad de posibilidades de aplicación, dado que se pueden combinar partes orgánicas-inorgánicas, metálicas-metálicas, metálicas-semiconductoras y metálicas-cerámicas. Las funciones que pueden ejercer estas partículas van desde médicas como en terapia, transporte y entrega de fármacos, sensores y diagnóstico. Otras aplicaciones se encuentran en las áreas medioambientales, electrónica y en energía.

Por otro lado, está bien reconocido que los nanomateriales se exponen a transformaciones químicas que podrían cambiar sus propiedades, esto es obvio

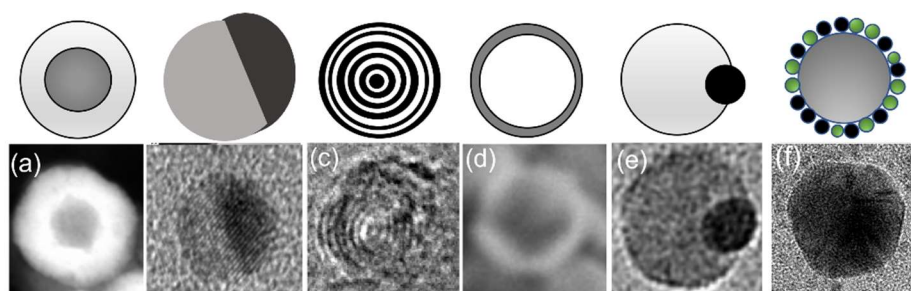


Figura 8. Diversas configuraciones existentes de nanopartículas híbridas: a) núcleo con una coraza (Higareda *et al.*, 2021 y Aguilar *et al.*, 2012), b) doble cara, Janus (Vidales *et al.*, 2017), c) multicoraza (Patiño-Carachure *et al.*, 2017), d) esférica hueca (Aguilar *et al.*, 2019), e) mancuerna (Ruíz-Baltazar *et al.*, 2015) y f) satelitales (Vidales *et al.*, 2017).

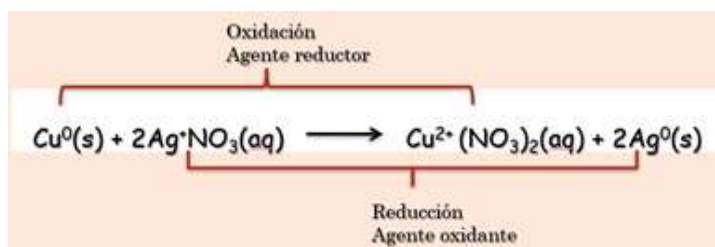


Figura 9. Reacción de intercambio galvánico para la síntesis de Nps del tipo núcleo-coraza.

desde el punto de vista que todas las reacciones suceden en forma iónica. Sin embargo, las NPs al ser tan pequeñas pueden reaccionar fácilmente transformándose de unos materiales a otros y por lo tanto, en forma paralela, esto permite controlar las características de los nanocrisales. Los fenómenos como el intercambio galvánico y el efecto Kirkendall (Anderson et al., 2014), que ya eran conocidos, pero que se acentúan en el estado nano se han aprovechado para formar múltiples reacciones entre los sólidos y controlar la composición y características físicas de los nanocrisales (Anderson et al., 2014). Para estos casos, además de las diferencias en los potenciales de ionización, influyen como siempre el pH del medio, la polaridad del disolvente, temperatura, etc. La figura 9 muestra un mecanismo clásico del efecto galvánico entre dos metales en solución, para formar partículas del tipo núcleo-coraza. En esta reacción espontánea participan nanopartículas de Cu, en cuya superficie los átomos se oxidan por la diferencia el potencial iónico de la plata (Ag), depositándose unos cuantos átomos de Ag sobre la superficie de Cu (Aguilar et al., 2012) y desalojando átomos de Cu del sólido a la solución.

Conclusiones

Cómo se deduce del avance del estudio de los materiales, el campo de estudio de la nanotecnología es una oportunidad en donde una simple e intuitiva aproximación se impone: “no se ve que hay, pero es probable que haya”, y no debemos escapar las ventajas que ofrece, dado que siempre esperamos encontrar algo nuevo y maravilloso que nos haga ser partes del descubrimiento en la existencia implícita.

Referencias

- Aguilar Hernández, M. S., 2012, Estructura y morfología de nanopartículas Cu-Ag sintetizadas por cementación MSc: tesis Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. 45 p.
- Aguilar, M. S., & Rosas, G., 2019, Facile synthesis of Cu₂O particles with different morphologies. *Journal of Solid-State Chemistry*, 270, 192-199. ISBN: 00224596 (print), ISBN: 1095726X (web). <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.11.019>
- Aguilar, M. S., Esparza, R., & Rosas, G., 2019, Time-dependent facile synthesis of CuO hedgehog-like nanostructures and their catalytic activity. *Journal of Solid State Chemistry*, 277, 46-53. ISBN: 00224596 (print), ISBN: 1095726X (web). <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.05.034>
- Anderson, B. D., & Tracy, J. B., 2014, Nanoparticle conversion chemistry: Kirkendall effect, galvanic exchange, and anion exchange. *Nanoscale*, 6, 21, 12195-12216. ISSN: 20403364 (print) ISSN: 2009-2020 (web). <https://doi.org/10.1039/C4NR02025A>
- Barhoum, A., García -Betancourt, M. L., Jeevanandam, J., Hussien, E. A., Mekkawy, S. A., Mostafa, M., & Bechelany, M., 2022, Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations. *Nanomaterials*, 12, 2, 177. ISSN 2079-4991 (web) <https://doi.org/10.3390/nano12020177>
- Biswas, P., & Wu, C. Y., 2005, Nanoparticles and the environment. *Journal of the air & waste management association*, 55, 6, 708-746. ISSN 1096-2247 (print), ISSN 2162-2906 (web). <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464656>
- Chin, B. L., Juwono, F. H., & Yong, K. S., 2022, Nanotechnology and Nanomaterials for Medical Applications. *Nanotechnology for Electronic Applications*, 63-87. Springer, Singapore. ISSN 2524-5384 (print), ISSN 2524-5392 (web).
- Aguilar Hernández, M. S., 2012, Estructura y morfología de nanopartículas Cu-Ag sintetizadas por cementación



- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, et al. 2014, Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9, 393, 1-13. 1556-276X (web) <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393>
- Esparza Muñoz R. A., 2007, Estudio de materiales nanoestructurados para su aplicación en una celda de combustible tipo PEM: Dc Thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. 56 p.
- Girard, H. A., Petit, T., Perruchas, S., Gacoin, T., Gesset, C., Arnault, J. C., & Bergonzo, P., 2011, Surface properties of hydrogenated nanodiamonds: a chemical investigation. *Physical chemistry chemical physics*, 13(24), 11517-11523. ISSN 1463-9076 (print), ISSN 1463-9084 (web). <https://doi.org/10.1039/C1CP20424F>
- Herrero-Calvillo, R., Santovena-Urbe, A., Esparza, R., & Rosas, G., 2020, A photocatalytic and electrochemical study of gold nanoparticles synthesized by a green approach. *Materials Research Express*, 7, 1, 015019. ISBN: 2014-2020
- Higareda, A., Rosas, G., Pérez, R., & Esparza, R., 2021, Characterization and Electrocatalytic Features of PtPd and PdPt Bimetallic Nanoparticles for Methanol Electro-oxidation. *ChemNanoMat*, 7, 8, 958-965. ISSN: 2199692X (print) ISSN: 2199-692X (web). <https://doi.org/10.1002/cnma.202100109>
- Höller, R. P., Jahn, I. J., Cialla-May, D., Chanana, M., Popp, J., Fery, A., & Kuttner, C., 2020, Biomacromolecular-assembled nanoclusters: key aspects for robust colloidal SERS sensing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 51, 57302-57313. ISSN: 1944-8244 (print); 1944-8252 (web). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16398>
- Kannan, K., & Yang, B. L., 2021, Metal-to-Semimetal Transition in Platinum Nanotubes: Dependence on Thickness. *Physical Chemical Letters*, 12, 9, 2183-2190 ISSN: 1089-5639 (print), ISSN: 1520-5215 (web) <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c00166>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I., 2019, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12, 7, 908-931. ISSN 1878-5352 (print), ISSN 1878-5379 (web) <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Kulkarni, S. K., & Kulkarni, S. K., 2015, Nanotechnology: principles and practices. Springer pp.1-29 ISBN 978-3-319-09170-9, ISBN 978-3-319-09171-6.
- Landeros Paramo J. L., 2018, Síntesis verde de nanopartículas TiO₂-Ag mediante extractos de *Origanum vulgare* y *Sedum praealtum*: MSc thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas 34 p.
- Mares-Briones, F., & Rosas, G., 2017, Structure and stability of gold nanoparticles synthesized using *Schinus molle* L. extract. *Journal of Cluster Science*, 28, 4, 1995-2003. 1040-7278 (print) 1572-8862 (web). <https://doi.org/10.1007/s10876-017-1197-x>
- Nagarajan, R., 2008, Nanoparticles: building blocks for nanotechnology. ACS Symposium Series, 996, Chapter 1pp 2-14, ISBN-10: 146134770X, ISBN-13:978-1461347705.
- Patiño-Carachure, C., Flores-Chan, J. E., Gil, A. F., & Rosas, G., 2017, Synthesis of onion-like carbon-reinforced Al-CuFe quasicrystals by high-energy ball milling. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 46-50. ISSN: 1991-2021 (print) ISSN: 0925-8388 (web). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.261>
- Patiño-Carachure, C., Martínez-Vargas, S., Flores-Chan, J. E., & Rosas, G., 2020, Synthesis of carbon nanostructures by graphite deformation during mechanical milling in air. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 28, 11, 869-876. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1776264>
- Rabouw, F. T., & Mello Donega, C. D., 2017, Excited-state dynamics in colloidal semiconductor nanocrystals. *Photoactive Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots*, Springer, Cham. *Top Current Chemistry* (Z) 374:58, ISBN 978-3-319-51191-7, ISBN 978-3-319-51192-4.
- Roco, M. C., 1999, Nanoparticles and nanotechnology research. *Journal of Nanoparticle Research*, 1(1), 1-6. ISSN: 1388-0764 (print); 1572-896X (web) DOI:10.1023/A:1010093308079
- Ruíz-Baltazar, A., Reyes-López, S. Y., Esparza, R., Estévez, M., Hernández-Martínez, Á., Rosas, G., & Pérez, R., 2015, Synthesis and characterization of bifunctional α -Fe₂O₃-Ag nanoparticles. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015. ISSN: 2199692X (print) ISSN: 2199-692X (web). <https://doi.org/10.1155/2015/320873>
- Sun, Z., Liao, T., & Kou, L., 2017, Strategies for designing metal oxide nanostructures. *Sci. China Mater.* 60, 1-24. ISSN:0024-9297 (print) 2199-4501 (web), <https://doi.org/10.1007/s40843-016-5117-0>
- Thompson, D., 2002, Nanotechnology: Basic science and emerging technologies. *Gold Bull* 35, 135-136 ISBN 1-58488-339-1, <https://doi.org/10.1007/BF03214856>

- Tritschler, U., Pearce, S., Gwyther, J., Whittell, G. R., & Manners, I., 2017, 50th anniversary perspective: Functional nanoparticles from the solution self-assembly of block copolymers. *Macromolecules*, 50, 9, 3439-3463. 0024-9297 (print) 1520-5835 (web). <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b02767>
- Vidales Rodríguez I. G., 2017, Biosíntesis y caracterización de nanopartículas bimetálicas de oro-paladio usando extracto de tamarix gallica para aplicaciones fotocatalíticas: MSc thesis Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas 85p.
- Zhou, L., Zhuang, Z., Zhao, H., Lin, M., Zhao, D., & Mai, L., 2017, Intricate hollow structures: controlled synthesis and applications in energy storage and conversion. *Advanced materials*, 29, 20, 1602914. ISSN: 0935-9648 (print). 1521-4095 (online). <https://doi.org/10.1002/adma.201602914>