

El jardín secreto de la nanotecnología: las nanoflores The secret garden of nanotechnology: nanoflowers

C. E. Lozano-Olvera ^a, M. E. Páez-Hernández ^{a*}, I. Pérez-Silva ^a, T. Montesinos-Vázquez ^a
G. A. Álvarez-Romero ^a, J. A. Rodríguez-Ávila ^a

^a Área Académica de Química, Ciudad del Conocimiento, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo km 4.5, Colonia Carboneras, C. P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

Los nanomateriales representan una poderosa herramienta para abordar los desafíos contemporáneos. Entre este tipo de materiales, las nanoflores se destacan gracias a sus propiedades que las hacen útiles y aplicables en diversas áreas de la ciencia como la medicina, la química, la tecnología y la energía. Las características esenciales de las nanoflores como su tamaño, forma, y propiedades, dependen directamente de su composición y el método de síntesis utilizado, esto les confiere cierto grado de adaptabilidad a las necesidades de cada una de las disciplinas mencionadas. Este artículo se centra en revisar las investigaciones científicas más recientes y relevantes, proporcionando una visión más profunda de las características, métodos de síntesis y aplicaciones más destacadas de las nanoflores.

Palabras Clave: Nanomateriales, nanoflores, características, síntesis, aplicaciones.

Abstract

Nanomaterials represent a powerful tool to address contemporary challenges. Among this type of materials, nanoflowers stand out because of their properties that make them useful and applicable in various areas of science such as medicine, chemistry, technology and energy. The essential characteristics of nanoflowers, such as their size, shape, and properties, depend directly on their composition and the synthesis method used, which gives them a certain degree of adaptability to the needs of each of the aforementioned disciplines. This article focuses on reviewing the most recent and relevant scientific research, providing a deeper insight into the most important characteristics, synthesis methods and applications of nanoflowers.

Keywords: Nanomaterials, nanoflowers, characteristics, synthesis, applications.

Los materiales que nos rodean son una parte fundamental en nuestra vida cotidiana: los libros que leemos, los teléfonos con los que nos comunicamos e incluso la ropa que utilizamos están hechos de materiales diversos con diferentes características que puede clasificarse según una serie de criterios tales como su morfología, dimensión, composición química y propiedades de interés. Actualmente, el desarrollo de materiales es considerado de gran importancia debido a su relevante papel en la economía global. Dentro de las razones para la creación de nuevos materiales se encuentran; la preservación y protección del medio ambiente, la reducción en el uso de materias primas e incluso incrementar la competitividad en el mercado mundial. Los nuevos materiales deben ofrecer propiedades superiores a los materiales tradicionales, por ejemplo, mejorar la resistencia al desgaste, a

las altas temperaturas, y disminuir el costo en la producción de estos (Rodríguez-Escobar *et al.*, 1999). La investigación en el campo de los materiales se centra principalmente en el desarrollo materiales elaborados con:

-Cerámicas: Compuestos dentro de los diversos materiales duros, quebradizos, resistentes al calor y corrosión que son obtenidos al moldear y cocer un material inorgánico no metálico (Carter *et al.*, 2012). Entre sus ejemplos más comunes se encuentran la loza, la porcelana, el ladrillo y la arcilla. Estos materiales pueden ser utilizados como hojas de cuchillos que permanecerán afiladas durante más tiempo que las hojas de cuchillo de acero, como placas con alta resistencia a la penetración usadas en vehículos y como chalecos blindados, o

*Autor para la correspondencia: paezh@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: lo383545@uaeh.edu.mx (Carlos Eduardo Lozano-Olvera), paezh@uaeh.edu.mx (María Elena Páez-Hernández), iperez@uaeh.edu.mx (Irma Pérez-Silva), mo233519@uaeh.edu.mx (Tanese Montesinos-Vázquez), gian@uaeh.edu.mx (Giaan Arturo Álvarez-Romero), josear@uaeh.edu.mx (José Antonio Rodríguez-Ávila).

Historial del manuscrito: recibido el 03/12/2023, última versión-revisada recibida el 30/01/2024, aceptado el 04/03/2023, en línea (postprint) desde el 11/03/2024, publicado el DD/MM/AAAA. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.12193>



bien, como implantes dentales y huesos sintéticos (Black *et al.*, 2012).

-Polímeros: Cualquier clase de material natural o sintético constituido por moléculas de gran tamaño, llamadas macromoléculas, que son a su vez conformadas por unidades químicas más simples llamadas monómeros. Pueden ser de naturaleza orgánica e inorgánica; aunque algunos polímeros están compuestos por exclusivamente un tipo de monómero, la gran mayoría de polímeros naturales y sintéticos están compuestos de dos o más tipos diferentes de monómeros, llamados copolímeros (Painter *et al.*, 1997). El amplio panorama de polímeros puede abarcar desde plásticos sintéticos muy utilizados como el poliestireno, hasta polímeros naturales biológicos como el DNA y las proteínas que son fundamentales para funciones y estructuras biológicas. El interés en los polímeros se genera a partir de sus propiedades como: elasticidad, resistencia a la tensión, la capacidad de las moléculas para moverse en el material (difusividad), las fuerzas de atracción entre las cadenas de polímeros, su capacidad como aislante eléctrico, etc. (Wypych, 2022). Por lo anterior, los polímeros son utilizados en casi todos los ámbitos como en la fabricación de ropa, de envases y recipientes, en la construcción, en pinturas o recubrimientos y en seguridad, entre muchos otros. Son considerados como uno de los avances químicos con mayor impacto en la vida cotidiana (Todd, 1975).

-Materiales semiconductores: Realizados a partir de compuestos de tipo orgánico e inorgánico, son materiales que tienen un valor de conductividad eléctrica comprendido entre un material conductor, como el cobre, y un material aislante, como el vidrio; generalmente la fuerza con la que se opone a este flujo de corriente eléctrica disminuye al aumentar la temperatura, comportándose de manera opuesta a los materiales metálicos, lo que sirve como una característica para la diferenciación entre estos dos materiales (Rodríguez, 2001). Una de las principales aplicaciones de los semiconductores es la creación de dispositivos como transistores en microchips de teléfonos celulares, laptops, microondas o refrigeradores (Calderón, 2003).

-Materiales metálicos: Compuestos a partir de metales o combinación de metales como cobre, aluminio, hierro, zinc, aluminio, oro y titanio. Son materiales que poseen una alta resistencia, durabilidad y conductividad eléctrica, por ello, son utilizados en diversas aplicaciones como la industria manufacturera, la industria de transporte e incluso de comunicaciones. Debido a sus características los materiales metálicos presentan una mejor resistencia a la ruptura y degradación, como la corrosión de su superficie; de esta forma, pueden ser aplicados en un mayor número de áreas de interés (Rodríguez-Escobar *et al.*, 1999).

Además de los materiales mencionados, ha surgido una categoría especialmente intrigante y revolucionaria, un mundo “diminuto” pero tan vasto como el de los materiales que son perceptibles a simple vista, llamado nanomateriales. Como su nombre lo indica, los nanomateriales tienen dimensiones dentro de la escala nanométrica; a esta escala los materiales miden tan solo la mil millonésima parte de un metro (nanómetro) y van desde 1 hasta los 100 nanómetros (nm). A

modo de comparación, un glóbulo rojo mide aproximadamente 7,000 nanómetros de diámetro (nm) (Cambell *et al.*, 2012) mientras que una molécula de agua mide alrededor de 0.3 nm (Vergara, 2015), lo que quiere significa que, si se considera un nanomaterial de 100 nm, un glóbulo rojo es aproximadamente 70 veces más grande y una molécula de agua es tan solo 333 veces más pequeña.

Muchas veces las palabras nanomaterial o nanopartícula pueden emplearse de manera indistinta, aunque algunos autores han definido a los nanomateriales como cualquier estructura interna o externa en la escala nanométrica y a las nanopartículas como estructuras con tres dimensiones externas en la escala nanométrica. Aún no existe una definición aceptada universalmente, pero estos materiales pueden clasificarse de acuerdo con su composición, tamaño, forma, y propiedades (Figura 1).

El avance en la investigación de los nanomateriales se hizo especialmente notable a mediados de los años 2000 (Sahu *et al.*, 2023), donde el interés por la construcción de materiales a escala nanométrica aumentó debido a la posibilidad de controlar y modificar su morfología. Investigaciones desde entonces, describen el desarrollo de nanoestructuras como son los nanoplatos, nanopartículas, nanofilamentos, nanotubos y puntos cuánticos, entre otras (Figura 2). Su obtención se logra mediante diversos métodos de síntesis (físicos, químicos y biológicos) a partir de diferentes compuestos que pueden ser metales y óxidos de estos metales (inorgánicos), tales como: plomo, níquel, cobre y hierro, o compuestos a base de carbono (orgánicos) como: proteínas, vitaminas y azúcares, entre otras moléculas orgánicas,

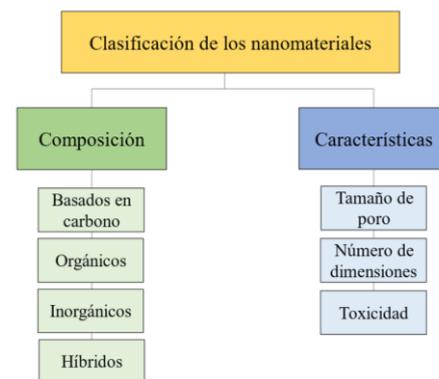


Figura 1: Clasificación de los nanomateriales. Elaboración propia.

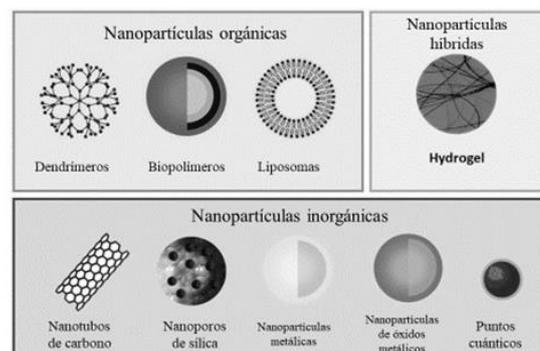


Figura 2: Tipos de nanoestructuras según su composición (Bhatia, 2016).

1.1. La particularidad de las nanopartículas

Los compuestos hechos a partir de partículas cerámicas o metálicas de tamaño nano pueden llegar a ser mucho más Los nanomateriales son más resistentes que los materiales de mayor tamaño, inclusive la fuerza de estos nanomateriales supera las expectativas previstas por modelos teóricos dentro de la ciencia de los materiales (Ordenes *et al.*, 2014).

El cambio drástico en las propiedades de los materiales a nanoescala es consecuencia de aspectos como:

- Los efectos cuánticos: A nanoescala efectos como el confinamiento cuántico domina las propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas, lo que se debe atribuye a que a escala macroscópica las propiedades de los materiales son un promedio de la actividad electrónica de todo el material, mientras que a escala nanoscópica, la actividad electrónica tiene una mayor variación debido a que los electrones no cuentan con una superficie por la cual moverse, ya que se encuentran confinados en una superficie muy pequeña, lo que altera los valores energéticos de los electrones a valores muy específicos y propician comportamientos y propiedades diferentes (Gosh, 2015).

- Aumento del área superficial: Al dividir un material en pedazos de menor tamaño hay un incremento en el área superficial total del material, ésta se incrementará si el material es nuevamente dividido en pedazos aún más pequeños (Figura 3) lo que incrementa los sitios con los que el material puede interactuar (sitios activos) (Wing, 2006). Al presentar un mayor número de sitios activos, puede aumentar la reactividad de los materiales y con ello, posibilitar su uso como materiales sorbentes (para la extracción de otras moléculas), catalizadores (mejoran el rendimiento de las reacciones químicas) y detectores (permiten el análisis de concentraciones muy pequeñas de moléculas de interés) (Ordenes, 2016).

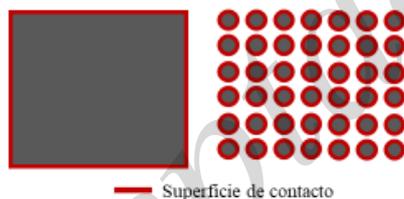


Figura 3: Representación del aumento en el área superficial de contacto al disminuir el tamaño de los materiales. Elaboración propia.

1.2. Las flores del nanojardín

Dentro de los nanomateriales destaca un sistema particular diferente y de interés creciente, denominado nanoflores. Las nanoflores son una clase relativamente nueva de nanomateriales que presentan una estructura muy interesante; esto debido a la presencia de “pétalos” que, como resultado del crecimiento controlado de las nanopartículas, visualmente se les asemeja a las flores que se encuentran en un jardín, pero dentro de la escala nanométrica (Figura 4). El interés científico en las nanoflores crece debido a la relativa simpleza de las metodologías de síntesis u obtención a partir de compuestos orgánicos e inorgánicos (Jafari-Nodoushan, 2022).

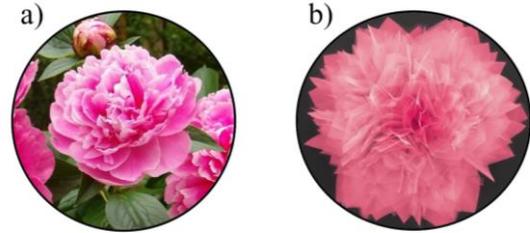


Figura 4: Comparación estructural de flores y nanoflores. a) Fotografía de flores peonía (Vercesi, 2008). CC BY-SA. b) Micrografía de nanoflores de cobre (Bruno, 2012). CC BY-SA.

Las nanoflores son nanomateriales tridimensionales que estructuralmente están compuestas por múltiples capas o “pétalos” que les proporcionan su característica morfología. Estas capas de “pétalos” incrementan el área superficial con respecto a otras nanoestructuras tridimensionales, lo cual permite a las nanoflores potenciar aún más su uso como catalizadores, detectores o sensores, conductores, sorbentes y agentes portadores de fármacos para el tratamiento de enfermedades (Shende *et al.*, 2018).

1.3. Los misterios de su esencia

Las características de mayor interés en las nanoflores son el tamaño y morfología las cuales están sujetas al control de las condiciones sintéticas; Se han reportado nanoflores que presentan pétalos más anchos, con gran longitud y más unidos entre sí que asemeja a una rosa; sin embargo, también se han desarrollado nanoflores en donde los pétalos son más angostos y de mayor separación entre sí, parecidos a un diente de león. Para la definición de la estructura y morfología de la nanoflores es necesario modificar las condiciones de síntesis, la temperatura y el tiempo de reacción, así como, la materia prima. Gracias a este último, las nanoflores pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza química de las moléculas que las constituyen en tres tipos:

- Nanoflores orgánicas: se componen únicamente de moléculas orgánicas (que contienen principalmente átomos de carbono); o bien, contienen elementos inorgánicos (metales, metaloides, algunos no metales) pero en una muy pequeña fracción de la molécula (Shende *et al.*, 2018).
- Nanoflores inorgánicas: son aquellas que han sido sintetizadas a partir de elementos o compuestos de naturaleza inorgánica (principalmente óxidos metálicos): Estas nanoflores poseen una mayor estabilidad en su estructura debido al tipo de interacción que presentan, la cual puede ser de tipo electrostática (similar a imanes). Así, las moléculas presentan un polo positivo y un polo negativo y la disposición espacial permite que estos polos contrarios sean alineados y se atraigan entre sí dando forma a las nanoflores (Jung-Lee *et al.*, 2022). Las nanoflores inorgánicas se sintetizan generalmente de metales o sus óxidos, siendo los más comunes los de cobre, zinc, calcio, hierro y magnesio.
- Nanoflores híbridas: Las nanoflores híbridas contienen proporciones significantes de ambos

componentes: orgánicos e inorgánicos. Por lo general las nanoflores híbridas son aquellas en las que compuestos orgánicos, por medio de enlaces de coordinación se unen a centros metálicos. Las vías sintéticas más comunes son la síntesis química (métodos solvotérmicos y de coprecipitación) y la síntesis biológica a partir de enzimas y proteínas (Negrón *et al.*, 2016). Generalmente las moléculas orgánicas que se incluyen son moléculas constituyentes de los seres vivos (biomoléculas) como: enzimas, proteínas, aminoácidos, biopolímeros y péptidos debido a que en su estructura se encuentran átomos o grupos de átomos (aminas y amidas) que permiten la interacción con los elementos inorgánicos (metales) (Chormey *et al.*, 2023). Por otro lado, los compuestos inorgánicos más utilizados para la formación de nanoflores híbridas son los metales; además de los mencionados anteriormente, también se han empleado plata, oro y titanio (Jung-Lee *et al.*, 2022).

Definir los reactivos, temperatura y tiempo de reacción que se utilizará para la síntesis permite predecir las posibles aplicaciones que pueda dársele a este nanomaterial.

2. Síntesis de nanoflores

La síntesis de nanoflores puede seguir diferentes metodologías; para facilitar el estudio, ésta puede dividirse en tres tipos.

2.1. Síntesis física

La síntesis física de nanoflores se basa principalmente en procesos en los cuales no existe un cambio en la composición química de los materiales de partida (reactivos). Para ello, los reactivos son sometidos a una fuente de calor que permite la evaporación de estos. Una vez en fase gas las moléculas son aceleradas hasta ser impactadas ante una placa o soporte (sustrato) que generalmente está hecho de silicio. Debido a la fuerza de impacto las moléculas se condensan formando una película o recubrimiento (condensación por colisión) como se observa en la Figura 5.

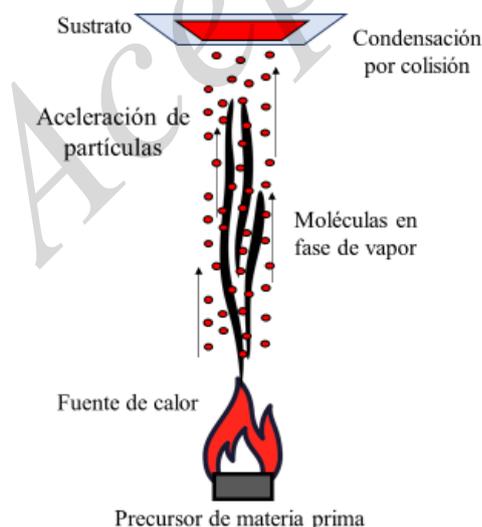


Figura 5: Diagrama de síntesis física de nanoflores por colisión. Elaboración propia.

2.2. Síntesis biológica

La síntesis biológica de nanoflores emplea organismos como plantas, hongos o bacterias. Cuando se utilizan plantas para la síntesis de las nanoflores, se deben obtener las moléculas de interés (extractos) para este propósito. Los extractos se obtienen a partir de procesos en los que las plantas son trituradas y las moléculas de interés se disuelven al ponerse en contacto con el solvente adecuado para extraer los compuestos, este proceso es conocido como maceración, o digestión si se necesita una mayor temperatura para completar la extracción. Los extractos contienen biomoléculas que mediante reacciones de oxidación o reducción con metales producen las nanoflores (Figura 6).

De forma similar, la síntesis de nanoflores mediante microorganismos, como bacterias, requiere la extracción de las enzimas presentes dentro o fuera (en forma de desecho) de las células bacterianas para la formación de nanoflores (Karisov, 2008).

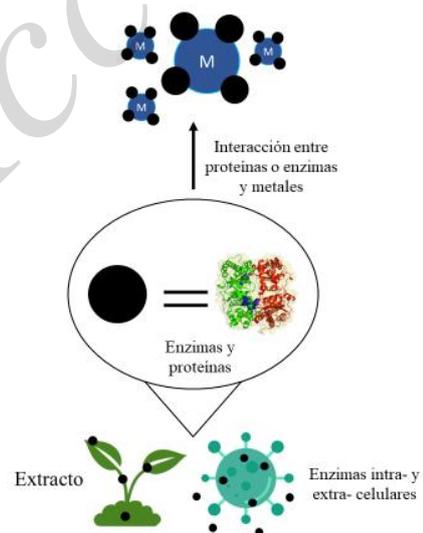


Figura 6: Diagrama de síntesis biológica de nanoflores por acción de extractos de plantas o enzimas de microorganismos. Elaboración propia.

2.3. Síntesis química

Uno de los métodos de síntesis más utilizados para la formación de nanoflores es la síntesis química, debido a la facilidad en su implementación y bajo costo.

El crecimiento de las nanoflores comienza con la formación de “centros” (núcleos), en los que las nanopartículas del medio comienzan a acercarse hasta interactuar unas con otras y formar centros o núcleos de crecimiento; este proceso es conocido como nucleación (Wang *et al.*, 2005). Posterior a la nucleación, los núcleos más pequeños tienden a perder nuevamente las nanopartículas al medio en un proceso de redisolución, dichas partículas son agregadas a los centros más grandes (más estables) y así forman la estructura de las nanoflores.

La síntesis química comprende una extensa variedad de metodologías que se basan en el cambio en la composición química debido a la interacción que existe entre los reactivos mediante reacciones químicas. La síntesis química utiliza como reactivos a metales, sales metálicas o compuestos orgánicos bajo parámetros establecidos para dicho proceso. Los parámetros son las condiciones en las que se llevan a cabo estas reacciones y pueden ser la temperatura, el pH, la concentración de los reactivos y la presencia de compuestos que permiten la formación y el control del tamaño de las nanoflores como pueden ser agentes surfactantes y agentes derivatizantes. Dependiendo de la metodología, se pueden añadir parámetros adicionales para la formación de las nanoflores, como la presión o la aplicación de corrientes eléctricas, entre otros (Kharisov, 2008).

Como puede apreciarse, las estrategias metodológicas para la síntesis de nanoflores son muy variadas; en la tabla 1 se reportan ejemplos representativos de síntesis y aplicación de las nanoflores obtenidas.

Tabla 1. Ejemplos representativos de métodos de síntesis para nanoflores y sus aplicaciones.

Método	Composición	Aplicación	Ref.
Físico	Sulfuro de bismuto- (Bi_2S_3) por deposición química en fase vapor.	Estudio de propiedades eléctricas para aplicación en pantallas.	Yu <i>et al.</i> , 2008.
	Óxido de hierro (Fe_2O_3) por deposición química en fase vapor.	Catalizador fotoelectroquímico para la oxidación.	Arzaee <i>et al.</i> , 2019.
	Molibdato de níquel (NiMoO_4), por deposición a deposición química en fase vapor asistida de aerosol.	Electrocatalizador para la oxidación de agua	Ehsan <i>et al.</i> , 2021.
	Óxido de zinc (ZnO), deposición química en fase vapor. sobre sustrato de silicato.	Estudio de las propiedades electroquímicas de las nanoflores formadas en comparación con nanopartículas de ZnO comerciales.	Zhang <i>et al.</i> , 2009.
	Sulfuro de molibdeno (MoS_2), deposición química en fase vapor.	Estudio de un método por vía física para la síntesis a gran escala de nanoflores de MoS_2 .	Xiao-Lin <i>et al.</i> , 2004.
Biológico	Plata (Ag) y extracto de la planta <i>Kalanchoe Diagremoniana</i> .	Catalizador en degradación de colorantes. Actividad antibacterial.	Kaufmann <i>et al.</i> , 2020.
	Cobre (Cu), a partir de una enzima en la bacteria <i>Streptomyces mobaraensis</i> .	Medicamento para la mitigación de cáncer de mama.	Syeda <i>et al.</i> , 2021.
	Óxido de magnesio (MgO), a partir de goma arábica.	Agente de remoción de metales divalentes como cobalto, cadmio, cobre, manganeso, plomo y níquel, en aguas residuales.	Varsha <i>et al.</i> , 2015.

Químico	Oro (Au), a partir de extracto de semilla de <i>Syzygium cumini</i> .	Agente antimicrobiano y anticancerígeno en células de hígado HepG2.	Borah <i>et al.</i> , 2018.
	Cobre (Cu), a partir de extracto de <i>Ascoseira mirabilis</i> .	Agente antimicrobiano y antioxidante. Actividad catalítica oxidante en reacciones biorgánicas.	Dogan <i>et al.</i> , 2023.
	Carbón activado-Cadmio (AC-Cd), por método solvotérmico.	Catalizador en degradación de colorantes.	Bhavsar <i>et al.</i> , 2020.
	Óxido de zinc (ZnO), por adición de surfactantes.	Adsorbente de metales pesados. Catalizador en procesos de degradación de colorantes y fertilizantes.	Qu <i>et al.</i> , 2020.
	Fosfato de cobre-streptavidin-peroxidasa, por precipitación.	Biomarcador para la detección de alfa-feto proteína en enfermedades como cáncer, VIH y hepatitis.	Yucheng <i>et al.</i> , 2017.
	Óxido de níquel (NiO), por método solvotérmico.	Sensor de gases mediante absorción en su superficie.	Zhang <i>et al.</i> , 2017.
	Óxido de titanio (TiO_2), por método hidrotérmico.	Desarrollo de fotoánodos con mayor conductividad eléctrica para paneles solares sensibilizados con colorantes (DSSCs).	Ma <i>et al.</i> , 2016.

3. Aplicaciones

Las nanoflores, como ya se ha mencionado, con base en las propiedades que poseen pueden ser aplicadas en diferentes campos de interés científico. Algunos ejemplos representativos según el campo se describen a continuación.

3.1. Medicina

El óxido de zinc ha sido utilizado para tratar y prevenir la dermatitis, quemaduras leves y raspones; además de sus propiedades como protector solar debido a que dispersa la radiación ultravioleta (Zhang *et al.*, 2013).

Más allá de los usos anteriormente descritos, las nanoflores de óxido de zinc presentan propiedades adicionales que pueden ser muy útiles en el ámbito médico.

Las nanoflores de óxido de zinc se han utilizado para la detección de proteínas como los amiloides que causan daños neurodegenerativos en enfermedades como la demencia y el Alzheimer (Figura 7). Esta detección se hace registrando la respuesta fluorescente que resulta de la interacción entre la proteína y la nanoflor de óxido de zinc (Akhtar *et al.*, 2017). Gracias a esta fluorescencia es posible mejorar la detección de dicha proteína y realizar diagnósticos tempranos para la prevención de estos riesgos neurodegenerativos.

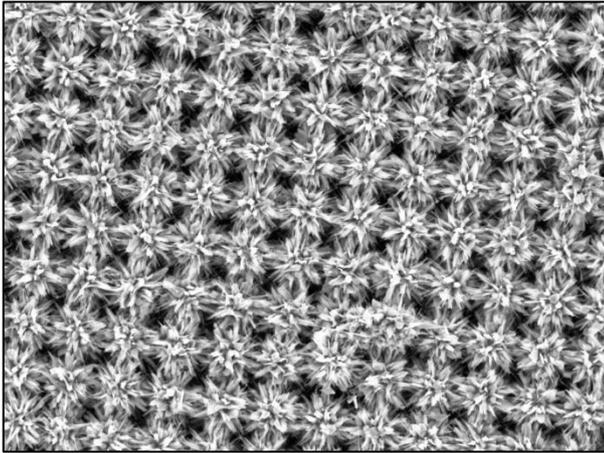


Figura 7: Nanoflores de óxido de zinc (Tarasov, 2019). CC BY.

Además de lo anterior, las nanoflores han sido utilizadas como agente cardiovascular para pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares isquémicos, lo que les impide formar vasos sanguíneos nuevos propiciando la coagulación de la sangre y la obstrucción de venas. En este sentido, las nanoflores de óxido de zinc han presentado propiedades angiogénicas, es decir, que incrementan la formación de nuevos vasos sanguíneos a partir de antiguos (angiogénesis) (Jeevan-Raj *et al.*, 2022).

Las nanoflores de oro han sido aplicadas en ensayos inmunológicos debido a su estabilidad, su elevada área superficial y su habilidad para mejorar la inmovilización de anticuerpos (Waleed *et al.*, 2010). Se ha descrito el desarrollo de un inmunosensor para la detección de antibióticos como la loxacina a partir de nanoflores de oro (Figura 8) como un potenciador de señal, así mismo, se han utilizado como detectores para moléculas específicas como medicamentos para el tratamiento de cáncer y aflatoxina B1 (Song *et al.*, 2023).



Figura 8: Nanoflores de Oro (Cheng, 2014) CC BY-SA.

Así mismo, las nanoflores han sido utilizadas en ámbitos bioquímicos y en estudios celulares; por ejemplo, las nanoflores de óxido de zinc (Figura 7) han sido investigadas para el crecimiento de células productoras de materia ósea y tejidos (osteoblastos) (Park *et al.*, 2010), los estudios demuestran que debido a su morfología el desarrollo de osteoblastos aumenta en comparación con películas finas de

óxido de zinc, gracias al incremento de sitios activos en donde puede llevarse a cabo la maduración de las células.

De igual manera, nanoflores híbridas se han desarrollado mejorando las actividades enzimáticas en comparación a los procesos en ausencia de estas; como las nanoflores de fosfato de calcio y α -quimotripsina, que han generado una ruta enzimática que incrementa su eficiencia como inmovilizadora para el aminoácido tirosina un 200%. Este incremento permite disminuir los trastornos derivados a la falta de tirosina, como insuficiencia hepática fulminante, úlceras cutáneas, artritis y desarrollo acelerado de cáncer de piel (Shcharbin *et al.*, 2019).

Otra aplicación importante e innovadora de las nanoflores es su uso como agentes portadores de fármacos para tratar diferentes enfermedades. Un claro ejemplo es el uso de nanoflores a base de moléculas en forma de anillo llamadas ciclodextrinas, que debido a su morfología pueden ser utilizadas para el “almacenamiento” temporal de fármacos que deben ser transportados hasta un órgano objetivo (Figura 9). Así, se ha descrito la aplicación de este tipo de nanoflores para el diseño de un sistema portador específico del 5-fluororacilo, el cual es una potente antimetabolito en el tratamiento del cáncer de colon. La baja tendencia de las ciclodextrinas a disolverse permite que el fármaco no sea disuelto en el estómago y llegue al órgano objetivo para ser absorbido por las paredes del tejido (Karthic *et al.*, 2022).

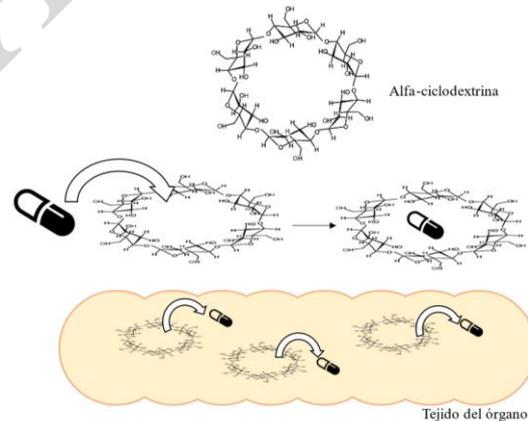


Figura 9: Ejemplo de aplicación de ciclodextrina para el movimiento específico de fármacos. Elaboración propia.

3.2. Tecnología

En la actualidad la tecnología es una herramienta indispensable para múltiples tareas cotidianas como la comunicación, transporte, investigación o entretenimiento. Dentro de este mundo tecnológico, existen dispositivos optoelectrónicos capaces de convertir la luz en energía eléctrica y viceversa. Los dispositivos optoelectrónicos constituyen una parte significativa del mercado mundial. La importante demanda de pantallas LED, el incremento del uso de vehículos eléctricos y autónomos y el desarrollo de sistemas avanzados de fabricación y manufactura, impulsan el uso de componentes y dispositivos optoelectrónicos en la actualidad (Kenyon *et al.*, 2002).

Además de lo anterior, varias técnicas de análisis químico (conocidas como técnicas espectroscópicas), requieren la detección de una fuente de energía (haz de luz) y el cambio en ésta, después del contacto con la materia por analizar (analito), (Figura 14). Para ello se busca el desarrollo de detectores modernos, capaces de detectar estas variaciones en concentraciones cada vez más pequeñas lo cual se ha logrado con el uso de nanoflores híbridas de galio y nanoflores de óxido de zinc con las que se han desarrollado detectores (fotodetectores) de radiación ultravioleta (UV) (Shibin *et al.*, 2020) y radiación infrarroja (IR) (Marica *et al.*, 2022), respectivamente; altamente sensibles para la detección de analitos en bajas concentraciones. El estudio de las propiedades optoelectrónicas para la elaboración de diversos dispositivos electrónicos ha permitido profundizar en la síntesis de nanoflores capaces de mejorar estas propiedades, tal es el caso de nanoflores más complejas compuestas por aleaciones de cobre-indio-zinc-azufre (Kempken *et al.*, 2015), oro-sulfuro de cadmio (Zhao *et al.*, 2020) o bien de bismuto sobre un soporte de silicio (Figura 10) (Aher *et al.*, 2022) para su posible aplicación como materiales capaces de controlar el flujo de la corriente eléctrica (semiconductores) útiles en el desarrollo de circuitos eléctricos para muchos fines (Kumar *et al.*, 2019).

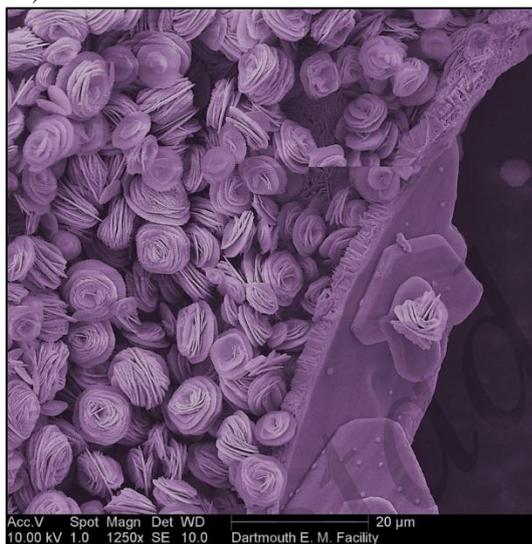


Figura 10: Nanoflores de bismuto (Aylin2789, 2017). CC BY.

3.3. Química

Dentro del ámbito químico, se han utilizado nanoflores de oro, óxido de hierro, óxido de cobalto (Figura 11) y nanoflores más complejas en su composición como cobre-paladio para catalizar procesos de oxidación de moléculas relativamente pequeñas como el monóxido de carbono (Liu *et al.*, 2018), y moléculas con grupos alcohol como el glicol (Jianguo *et al.*, 2023) o bisfenol A (Dong *et al.*, 2018).



Figura 11: Nanoflores de cobalto (Universidad de Bath, 2022). CC BY-SA.

Adicionalmente, las nanoflores de óxido de zinc han sido utilizadas como catalizadores en procesos de síntesis como el de la chalcona, que puede utilizarse para controlar los niveles de colesterol en sangre (Tamuly *et al.*, 2015). También, las nanoflores de óxido de zinc y de cobre han sido aplicadas como catalizadores sensibles a la luz (fotocatalizadores) para la degradación del azul de metileno (Jeevan-Raj *et al.*, 2022) que es considerado como contaminante en los cuerpos de agua. De igual manera, nanoflores de sulfuro de molibdeno (Roy *et al.*, 2020) y óxido de manganeso (Chiam *et al.*, 2022) (Figura 12) han demostrado actividad catalítica para la degradación de rodamina B (Roy *et al.*, 2020), la cual es considerada como un contaminante cancerígeno (Mchedlov-Petrosyan *et al.*, 2004).

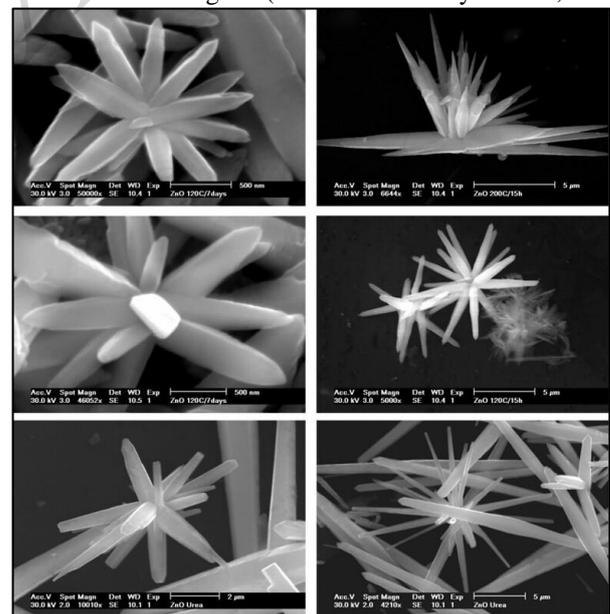


Figura 12: Nanoflores de óxido de manganeso (ICMAB CSIC, 2017).

Las nanoflores de oro, también han sido utilizadas para la obtención de compuestos con una configuración tridimensional específica denominada quiralidad, por ejemplo, en la síntesis de rodamina, la cual es muy utilizada en ensayos biológicos (Bera *et al.*, 2015). También se describe el uso de nanoflores más complejas estructuralmente a partir de paladio y oro (Xu *et al.*, 2011) que se utilizan para la síntesis de moléculas de mayor tamaño a partir de moléculas pequeñas, mediante un proceso sintético denominado acoplamiento de

tipo Suzuki, en donde las nanoflores funcionan como un “puente” para la obtención de estas moléculas de mayor tamaño.

Algunas nanoflores, como las de cobre e hidróxido de níquel se han utilizado para fines medioambientales (Yi *et al.*, 2021), ya que permiten la extracción de metales pesados en aguas residuales a partir de un proceso de adsorción, en donde los contaminantes se adhieren a la superficie de la nanoflor (Figura 13). La tabla 2 muestra las nanoflores que han sido estudiadas para procesos de adsorción para diferentes contaminantes en medios acuosos.

Tabla 2. Nanoflores aplicadas para procesos de adsorción de contaminantes en medios acuosos.

Nanoflor	Contaminante adsorbido	Ref.
Óxido de zinc (ZnO).	Plomo (Pb (II)), Cromo (Cr (VI)).	Berberoglu, <i>et al.</i> , 2023.
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃).	Insecticida (clorpirifós).	Abdelarahman <i>et al.</i> , 2019.
Óxido de titanio (TiO ₂).	Cadmio (Cd (II)), Zinc (Zn (II)), Níquel (Ni (II)).	Engates <i>et al.</i> , 2011.
Sulfuro de molibdeno (MoS ₂).	Cromo (Cr (VI)).	Meng <i>et al.</i> , 2022.
Óxido de manganeso (MnO ₂).	Rodamina B, Naranja de metilo, Rojo de metilo.	Chiam <i>et al.</i> , 2022.
Peróxido de zinc (ZnO ₂).	Azul de metileno.	Naim, 2023.

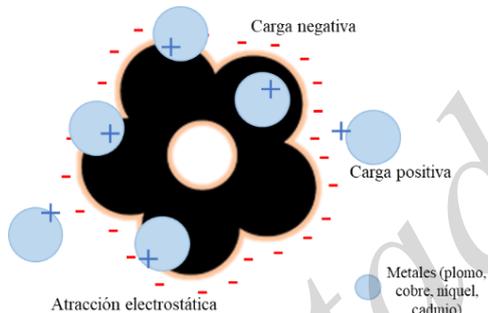


Figura 13: Interacciones electrostáticas para la adhesión de metales sobre la superficie de las nanoflores (adsorción). Elaboración propia.

3.4. Energía

En la actualidad, la producción de sistemas de almacenamiento energético ha sido un tema de interés, debido al incremento en la demanda de dispositivos portátiles que necesitan baterías eficaces para mantener su función por periodos cada vez mayores de tiempo. Por esto, la producción de baterías recargables o paneles solares se ha enfocado en la mejora de la capacidad de almacenar energía para su posterior uso; sin embargo, el estudio de sistemas cada vez más pequeños ha traído consigo el desarrollo de nuevos materiales que tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía y depositarla a una velocidad muy rápida (supercapacitores). A pesar de que las nanoflores son un tópico relativamente nuevo se ha descrito el uso de nanoflores de níquel para la fabricación de supercapacitores (Yi *et al.*, 2021), que posteriormente serán usados en industrias manufactureras y automotrices. Así mismo, se describe el uso de nanoflores de paladio-cobreniteno (Lee *et al.*, 2023) que incrementan la eficiencia en el

proceso de conversión de la luz solar en energía eléctrica debido a su facilidad de movilidad electrónica para su aplicación en el desarrollo de celdas solares y así proporcionar alternativas energéticas eficientes (Figura 14).

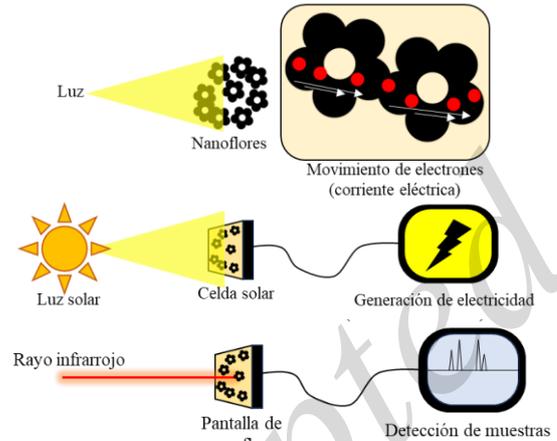


Figura 14: Propiedad optoelectrónica de las nanoflores y su posible aplicación como detectores y celdas solares. Elaboración propia.

4. Desafíos de las nanoflores: la fragilidad en lo diminuto

Las nanoflores, como nanoestructuras tridimensionales presentan una serie de dificultades. En la Figura 15 se muestra un esquema general con los principales desafíos que se pueden encontrar al trabajar con este tipo de materiales.



Figura 15: Esquema general de posibles desafíos en el uso y desarrollo de nanoflores. Elaboración propia.

4.1. Síntesis

Lograr una síntesis reproducible de nanoflores con una morfología específica, requiere un amplio conocimiento del crecimiento de dichas nanoestructuras. En el caso de la síntesis química el control en la velocidad (cinética) de este crecimiento es fundamental para la morfología de la nanoflor; esto puede controlarse mediante la temperatura del proceso de síntesis, sin embargo, controlar la temperatura dentro de los reactores en los que ocurre la reacción puede llegar a ser complicada de adaptar (en sistemas menos sofisticados) o de elevados costos (en sistemas modernos), lo que representa un

desafío directo para el control en la morfología de las nanoflores (Shende *et al.*, 2018).

4.2. Caracterización

Determinar la estructura y composición de las nanoflores puede ser complejo debido a la naturaleza que las compone y su distribución en el espacio (arreglo tridimensional). Para ello se aplican métodos como la difracción de rayos X (XRD) para polvos, que permite conocer el arreglo tridimensional de las nanoflores a partir de la variación en los ángulos de rayos X (difracción) que sufren al atravesar la estructura de las nanoflores. Las desviaciones angulares permiten conocer la distribución espacial de las nanoflores, sin embargo, la obtención de la respuesta (denominada patrones de difracción) puede ser complicada debido a que en la muestra la orientación de las nanoflores no es uniforme por la aleatoriedad en las partículas (Kharisov *et al.*, 2008). Las diferentes orientaciones tienen diferentes ángulos de dispersión de los rayos X y no se puede obtener un patrón de difracción como se esperaría si estas estuvieran distribuidas uniformemente. De igual manera, la diferencia de los tamaños de las nanoflores afectan a los patrones de difracción para la obtención de su estructura, bajo el mismo principio que la aleatoriedad de las partículas (Bhatia *et al.*, 2016).

Otra técnica de caracterización muy utilizada para las nanoflores, es la microscopía electrónica de barrido (SEM). La microscopía electrónica de barrido funciona a partir de un bombardeo de electrones (haz de electrones) sobre una superficie que se desee estudiar, los electrones bombardeados son enfocados por un lente magnético y dirigidos hacia la muestra que se desea observar, el haz de electrones recorre (barre) la superficie como si estuviera pintando una imagen. Cuando los electrones golpean la muestra, la muestra responde de diferentes maneras; algunos electrones son reflejados en diferentes direcciones a las que fueron incididos y otros son liberados de la superficie de la muestra, ambos tipos de electrones son detectados y convertidos computacionalmente para la obtención de las imágenes que presentan los detalles de la superficie (Penagos, 2013). Sin embargo, las nanoflores poseen una semiconductividad eléctrica, por lo que, durante el bombardeo electrónico se pueden acumular electrones (carga negativa) en la superficie de las nanoflores produciendo distorsiones en la imagen (Bhatia *et al.*, 2016).

A esto debe agregarse que los microscopios electrónicos de barrido y los difractómetros de rayos X son equipos costosos de adquirir y mantener, además requieren de una capacitación adecuada para su uso efectivo, lo que dificulta en muchas ocasiones el estudio de las nanoflores en diferentes centros de investigación.

4.3. Aplicación

Adaptar las nanoflores para aplicaciones específicas, implica que la función que deban realizar sea efectiva y la garantía de que puedan ser utilizadas inclusive después de un almacenamiento considerable o en condiciones adversas en su aplicación. Para ello, se debe hacer un estudio del ambiente químico en el que las nanoflores serán utilizadas, por ejemplo,

dentro del cuerpo humano la temperatura ideal es de 37°C, con pH neutro y con un contenido específico de sales (Zhang *et al.*, 2010). Por ello, la aplicación de nanoflores como agentes para tratar enfermedades o como sistemas portadores de medicamentos específicos, deben ser capaces de cumplir los objetivos a partir de su estabilidad en el sistema (Bathia *et al.*, 2016). En consecuencia, es necesario realizar estudios preliminares que permitan conocer el comportamiento de las nanoflores en medios y sistemas que emulen las condiciones reales de trabajo.

Para valorar la utilidad de las nanoflores, deben realizarse estudios de toxicidad, que permitan evaluar si el uso de las nanoflores perjudica el medio ambiente o la salud humana, con el fin de obtener información que permita considerar a las nanoflores como una vía saludable en la aplicación que vaya a dársele. En ocasiones el uso de metales y moléculas orgánicas en la formación de nanoflores, puede llegar a ser contraproducente debido a que éstas pueden interactuar negativamente con las células, llegando a producir enfermedades crónicas e inclusive mutar a las mismas para inducir cáncer en el organismo (Shende *et al.*, 2018).

5. Conclusiones

Las nanoflores representan una clase fascinante de nanoestructuras tridimensionales con una morfología única y muy variada. Presentan un conjunto de propiedades que en el mundo actual amplían sus posibilidades de aplicación dentro de importantes campos científicos como son la medicina química, tecnología y energía. Las nanoflores pueden ser sintetizadas de diversas maneras, ya sea empleando organismos (síntesis biológica), mediante procesos en los que, no existen cambios en la estructura química de las moléculas que lo componen (síntesis física) y procesos en los que se transforma a la materia de partida mediante diferentes condiciones (síntesis química).

Las nanoflores, como las flores que conocemos, son un extenso jardín en el que la diversidad en formas, tamaños y sus propiedades únicas, nutre a este pequeño y fascinante mundo. A pesar de los desafíos, las nanoflores siguen siendo sujetas a exploración y son aplicadas con un amplio panorama de propósitos. Esta versatilidad les permite florecer en áreas como la catálisis, la fabricación de detectores, sensores y marcadores biológicos, en la liberación de fármacos de manera controlada, su uso como medicamentos y tratamientos de enfermedades; así como para la remoción de contaminantes del agua, entre muchas otras más.

El constante desarrollo de las nanoflores les permitirá convertirse en piezas fundamentales para la fabricación de productos, que sean más eficientes y den solución a muchas de las problemáticas del mundo actual.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONAHCyT y al SNI por el apoyo recibido para la redacción de este manuscrito.

Referencias

- Abdelrahman, E. A., Hegazy, R. M., Kotp, Y., Alharbi, A. (2019). Facile synthesis of Fe₂O₃ nanoparticles from Egyptian insecticide cans for efficient photocatalytic degradation of methylene blue and crystal violet dyes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. DOI: 10.1016/j.saa.2019.117195.
- Aher, R., Punde, A., Shinde, P., Shah, S., DOIphode, V., Waghmare, A., Hase, Y., Bade, B. R., Jadhav, Y., Prasad, M., Pathan, H. M., Patole, S. P., Jادkar, S. R. (2022). Synthesis, Structural and Optical Properties of ZrBi₂Se₆ Nanoflowers: A Next-Generation Semiconductor Alloy Material for Optoelectronic Applications. *ACS Omega*, 7(36), 31877–31887.
- Akhtar, N., Metkar, K., Girigoswami, A., Girigoswami, K. (2017). ZnO nanoflower based sensitive nano-biosensor for amyloid detection. *Materials Science and Engineering C-Materials for Biological Applications*, 1(78), 960-968. DOI: 10.1016/j.msec.2017.04.118.
- Arzaee, N. A., Mohamad, M. F., Halim, A. A., Abdul, M. A. F., Mohamed, N. A., Safaei, J., Aadenan, A., Syed, S. N., Ismail, A. F., Teridi, M. A. (2019). Aerosol-assisted chemical vapour deposition of α -Fe₂O₃ nanoflowers for photoelectrochemical water splitting. *Ceramics International*, 45(14), 16797-16802.
- Aylin2789. (18 de octubre, 2017). Nanoflores de bismuto. [Micrografía] Recuperado de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/AA-2-3_PURPLENANOFLOWERS.tif/lossy-page1-585px-AA-2-3_PURPLENANOFLOWERS.tif.jpg?20211227150907.
- Bender, P., Fock, J., Frandsen, C., Hansen, M. F., Balceris, C., Ludwig, F., Johansson, C. (2018). Relating magnetic properties and high hyperthermia performance of iron oxide nanoflowers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(5), 3068-3077.
- Bera, K., Ghosh, T., & Basak, S. (2015). Synthesis of Chiral, Crystalline Au-Nanoflower Catalyst Assisting Conversion of Rhodamine-B to Rhodamine-110 and a Single-Step, One-Pot, Eco-Friendly Reduction of Nitroarenes. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(4), 1800–1808. DOI:10.1021/jp5086125.
- Berberoglu, E. A., Koc, M. M., Yetim, N. K., Özcan, C. (2023). Highly efficient ZnO nanoflowers for the removal of highly toxic aqueous Pb(II) and Cr(VI). *Journal of the Iranian Chemical*, 20, 2821-2830.
- Bhatia, S. (2016). Nanoparticles types, classification, characterization, fabrication methods and drug delivery applications. *Natural Polymer Drug Delivery Systems: Nanoparticles, Plants, and Algae*, 33-93.
- Bhavsar, K. S., Labhane, P. K., Dhake, R. B., & Sonawane, G. H. (2020). Solvothermal synthesis of activated carbon loaded CdS nanoflowers: Boosted photodegradation of dye by adsorption and photocatalysis synergy. *Chemical Physics Letters*, 744, 137202. DOI:10.1016/j.cplett.2020.137202.
- Black, J. T.; Kohser, R. A. (2012). DeGarmo's materials and processes in manufacturing. Wiley. p. 226. ISBN 978-0-470-92467-9.
- Borah, D., Hazarika, M., Tailor, P., Silva, A. R., Chetia, B., Singaravelu, G., Das, P. (2018). Starch-templated bio-synthesis of gold nanoflowers for in vitro antimicrobial and anticancer activities. *Applied Nanoscience*, 8, 241-253.
- Bruno, V. (12 de octubre, 2012). Nanoflores de cobre. [Micrografía]. Recuperado de: <https://flic.kr/p/dj5jpb>.
- Calderón, H. A. (2003). Fabricación y caracterización óptica de materiales semiconductores para aplicaciones en optoelectrónica. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 357-368.
- Cambell, N. A., Lesak, A. E. (2012). Libro de laboratorio de anatomía y fisiología. Editorial Paidotribo. ISBN 978-84-8019-652-9. Consultado el 18 de noviembre de 2023.
- Carter, C. B., Norton, M. G. (2007). *Ceramic materials: Science and engineering*. Springer, 20-21. ISBN 978-0-387-46271-4
- Cheng, X. (17 de septiembre, 2014). Nanoflores de oro en la punta de un nanotubo. [Micrografía]. Recuperado de: <https://flic.kr/p/oYiA6j>.
- Chiam, S. L., Pung, S. Y., Yeoh, F. Y., Ahmadipour, M. (2022). Highly efficient oxidative degradation of organic dyes by manganese dioxide nanoflowers. *Materials Chemistry and Physics*, 280. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.125848.
- Chormey, D. S., Erarpat, S., Zaman, B. T. (2023). Nanoflower synthesis, characterization and analytical applications: a review. *Environmental Chemical Letters* 21, 1863–1880.
- Dogan, F., Matz, H., Konuklugil, B. (2023). Synthesis of hybrid nanoflowers using extract of *Ascoseira mirabilis*, a large brown parenchymatous macroalga endemic to the Antarctic Ocean, as the organic component and evaluation of their antimicrobial, catalytic, and antioxidant activities. *Applied Nanoscience*, 13, 4787-4794.
- Dong, Z., Zhang, Q., Chen, B.-Y., & Hong, J. (2018). Oxidation of Bisphenol A by persulfate via Fe₃O₄- α -MnO₂ nanoflower-like catalyst: Mechanism and efficiency. *Chemical Engineering Journal*. DOI:10.1016/j.cej.2018.09.179.
- Ehsan, M. A., Khan, A. (2021). Aerosol-Assisted Chemical Vapor Deposition Growth of NiMoO₄ Nanoflowers on Nickel Foam as Effective Electrocatalysts toward Water Oxidation. *ACS Omega*, 6, 31339-31347.
- Engates, K., Shipley, H. J. (2011). Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: Effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(3), 386-395.
- Ghosh, C. K. (2015). Quantum effect on properties of nanomaterials. In *Introduction to nano: Basics to nanoscience and nanotechnology* (pp. 73-111). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ICMAB CSIC. (30 de noviembre, 2017). Nanoflores de óxido de manganeso MgO₂. [Micrografía]. Recuperado de: <https://flic.kr/p/CnLkMF>.
- Jafari-Nodoushan, H., Mojtavabi, S., Faramarzi, M. A., & Samadi, N. (2022). Organic-inorganic hybrid nanoflowers: The known, the unknown, and the future. *Advances in Colloid and Interface Science*, 102780.
- Jeevan-Raj, V., Gosh, R., Girigoswami, A., Girigoswami, K. (2022). Application of zinc oxide nanoflowers in environmental and biomedical science. *BBA Advances*, 2. DOI: 10.1016/j.bbadv.2022.100051.
- Jianguo, Y., Zehui, Y., Yunling, J., Ting, R., Ming, S., Yanshuang Z., Qing, W., Yuning, Q., Lili, W. (2023). Nanoflower core-shell Cu@Pd catalysts for glycol oxidation reaction with an enhanced performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*, 674. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131928.
- Jung-Lee, S., Jang, H., Nam-Lee, D. (2022). Inorganic nanoflowers-Synthetic strategies and physicochemical properties for biomedical applications: A review. *Pharmaceutics*, 14(9). DOI: 10.3390/pharmaceutics14091887.
- Karthic, A., Roy, A., Lakkakula, A., Alghamdi, S., Shakoori, A., Babalghith, A. O., Emran, T. B., Sharma, R., Lima, C. M., Kim, B., Park, M., Zaman, S., Almeida, R. A., Coutinho, H. D. (2022). Cyclodextrin nanoparticles for diagnosis and potential cancer therapy: A systematic review. *Molecular & Cellular Pathology*, 10. DOI: 10.3389/fcell.2022.984311.
- Kaufmann, C. G., Zampiva, R. Y., Anzanello, M. J., Alves, A. K., Bergmann, C. P., Mortari, A. R. (2020). One-step synthesis of carbon nanoflowers by arc discharge in water. *Ceramics International*, 46, 26229-26232.
- Kempken, B., Erdt, A., Parisi, J., Kolny-Olesak. (2015). Size control of alloyed Cu-In-Zn-S nanoflowers. *Journal of Nanomaterials*, 16(1), 397-405.
- Kenyon, A. J. (2002). Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics. *Progress in Quantum Electronics*, 26(4-5), 225-284.
- Kharisov, B. I. (2008). A review for synthesis of nanoflowers. *Nanotechnology*, 2, 190-200.
- Kumar, M., Jeong, H., Lee, D. (2019). UV photodetector with ZnO nanoflowers as an active layer and a network of Ag nanowires as transparent electrodes. *Superlattices and Microstructures*, 126, 132–138. DOI:10.1016/j.spmi.2018.12.004
- Lee, S. J., Jang, H., Lee, D. N. (2023). Recent advances in nanoflowers: compositional and structural diversification for potential applications. *Nanoscale Advances*, 5(19), 5165-5213.
- Liu, N., Tao, P., Jing, C. (2018). A facile fabrication of nanoflower-like Co₃O₄ catalysts derived from ZIF-67 and their catalytic performance for CO oxidation. *Journal of Materials Science* 53, 15051–15063. DOI: 10.1007/s10853-018-2696-3.
- Ma, J., Ren, W., Zhao, J., Yang, H. (2016). Growth of TiO₂ nanoflowers photoanode for dye-sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.134.
- Marica, I., Nekkavil, F., Stefan, M., Farcau, C., Falamas, A. (2022). Zinc oxide nanostructures for fluorescence and Raman signal enhancement: a review. *Journal of Nanotechnology*, 13, 472-490.
- Mchedlov-Petrosyan, N. O., & Kholin, Y. V. (2004). Aggregation of rhodamine B in water. *Russian journal of applied chemistry*, 77, 414-422.
- Meng, F. Y., Wu, H., Qiao, M., Zeng, X. F., Wang, D., Wang, J. X. (2022). N-Doped MoS₂ Nanoflowers for Efficient Cr(VI) Removal. *Langmuir*, 38(4), 1567-1577.
- Naim, A. F. A. (2023). Mesoporous and nanoflowers (ZnO₂) via a hydrothermal technique for dye removal and antibacterial applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 151. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110575.
- Negrón, L. M., Díaz, T. L., Ortiz-Quiles, E. O., Dieppa-Matos, D., Madera-Soto, B., Rivera, J. M. (2016). Organic nanoflowers from a wide variety of molecules templated by a hierarchical supramolecular scaffold. *Langmuir*, 32(10), 2283-2290.
- Ordenes, R., Arellano, M., Jara, R., Merino, R. (2014). Representaciones macroscópicas, submicroscópicas y simbólicas sobre la materia. *Educación química*, 25(1), 44-65.

- Painter, Paul C.; Coleman, Michael M. (1997). *Fundamentals of polymer science: an introductory text*. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co. p. 1. ISBN 978-1-56676-559-6.
- Park, J. K., Kim, Y. J., Yeom, J., Jeon, J. H., Yi, G. C., Je, J. H., Hahn, S. K. (2010). The Topographic Effect of Zinc Oxide Nanoflowers on Osteoblast Growth and Osseointegration. *Advanced Materials*, 29. DOI: 10.1002/adma.201002255.
- Penagos, J. I. C. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3), 133-146.
- Qiao, M., Meng, F.-Y., Wu, H., Wei, Y., Zeng, X.-F., Wang, J.-X. (2022). PtCuRu Nanoflowers with Ru-Rich Edge for Efficient Fuel-Cell Electrocatalysis. *Small*, 18, 2204720. DOI: 10.1002/sml.202204720.
- Qu, Y., Huang, R., Qi, W., Shi, M., Su, R., He, Z. (2020). Controllable synthesis of ZnO nanoflowers with structure-dependent photocatalytic activity. *Catalysis Today*, 332, 397-407.
- Rodríguez, P. (2001). *Semiconductores*. Tecnibook ediciones.
- Rodríguez-Escobar, W., Bejarano-Barrera, H., Villazón, Amarís, H. (1999). Importancia estratégica de los nuevos materiales en el desarrollo sostenible y como alternativa de competitividad. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 8, 33-42.
- Roy, J. S., Dugas, G., Morency, S., Messadeg, Y. (2020). Rapid degradation of Rhodamine B using enhanced photocatalytic activity of MoS₂ nanoflowers under concentrated sunlight irradiation. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 120. DOI: 10.1016/j.physe.2020.114114.
- Sahu, M. K., Yadav, R., Tiwari, S. P. (2023). Recent advances in nanotechnology. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 9(2), 15-23. DOI: 10.17352/2455-3492.000053
- Shende, P., Kasture, P., Gaud, R. S. (2018). Nanoflowers: the future trend of nanotechnology for multi-applications. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. DOI: 10.1080/21691401.2018.1428812.
- Shibin, A., Shibin, N., Shibin, K. (2020). GaN Nanoflowers: Growth to Optoelectronic Device. *21st Century Nanoscience – A Handbook: Nanophotonics, Nanoelectronics, and Nanoplasmonics* Edited by Klaus D. ISBN 9780815356417.
- Song, R., Wang, X., Chen, P., Wang, Z., Ma, X. (2023). A gold nanoflower based dual mode aptasensor for aflatoxin B1 detection using SERS and fluorescence effect simultaneously. *Spectrochim Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. DOI: 10.1016/j.saa.2023.122963.
- Syeda, F., Khalid, I., Mohammad, M., Rizvi, A., Sunil, K. K. (2021). Microbial transglutaminase nanoflowers as an alternative nanomedicine for breast cancer theranostics. *RSC Advances*, 11(55), 34613-34630. DOI: 10.1039/d1ra04513j.
- Tamuly, C., Saikia, I., Hazarika, M., Bordoloi, M., Hussain, N., Das, M. R., & Deka, K. (2015). Bio-derived ZnO nanoflower: a highly efficient catalyst for the synthesis of chalcone derivatives. *RSC Advances*, 5(12), 8604–8608. DOI:10.1039/c4ra14225j.
- Tarasov, A. P. (13 de Abril, 2020). Nanoflores de óxido de zinc. [Micrografía]. Recuperado de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Such_different_zin_c_oxide_-_nanoflowers_network.jpg.
- Todd, A. (1975). El estado de la química. *Archivo de noticias de química e ingeniería*. 58 (40): 28–33. DOI: 10.1021/cen-v058n040.p028. ISSN 0009-2347.
- Universidad de Bath. (16 de junio, 2022). Nanoflores de óxido de cobalto Co₃O₄. [Micrografía]. Recuperado de: <https://flic.kr/p/2nsmppS>.
- Varsha, S., Sharma, Y. C., Sillanpää, M. (2015). Green synthesis of magnesium oxide nanoflower and its application for the removal of divalent metallic species from synthetic wastewater. *Ceramics International*, 15. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.01.11.
- Vercesi, P. (5 de marzo, 2008). Peonia. [Fotografía]. Recuperado de: <https://flic.kr/p/4wpm4N>.
- Vergara, E. (2015). *En torno al universo invisible*. Editorial Lulu. ISBN 9781447509066. Consultado el 18 de noviembre del 2023.
- Waleed, A. E. S., Tae-Hyung, K., Hyuncheol, K., Jeong-Woo, C. (2010). Detection of effect of chemotherapeutic agents to cancer cells on gold nanoflower patterned substrate using surface-enhanced Raman scattering and cyclic voltammetry. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(4), 1486-1492.
- Wang, L. K., Vaccari, D. A., Li, Y., Shammas, N. K. (2005). Chemical precipitation. In *Physicochemical treatment processes*. Humana Press, 141-197.
- Wing, C. E. G. (2006). Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial. *El Inin Hoy, Contacto Nuclear*, 24-29.
- Wypych, G. (2022). *Handbook of polymers*. Elsevier.
- Xiao-Lin, L., Jiang-Ping, G., Ya-Dong, L. (2004). Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition: An Alternative Route to Large-Scale MoS₂ and WS₂ Inorganic Fullerene-like Nanostructures and Nanoflowers. *Chemistry Europe*, 10, 6163-6171.
- Xiaoshuang, Z., Shenwan, L., Tongdai, H., Hongmei, S., Hongda, Z., Huiling, G., Mingxing, L. (2020). Synthesis of Au/Bi₂S₃ nanoflowers for efficient photothermal therapy. *New Journal of Chemistry*, 43, 18724-18731.
- Xu, J., Wilson, A. R., Rathmell, A. R., Howe, J., Chi, M., & Wiley, B. J. (2011). Synthesis and Catalytic Properties of Au–Pd Nanoflowers. *American Chemical Society Nano*, 5(8), 6119–6127. DOI:10.1021/nn201161m.
- Yi, X., Sun, H., Robertson, N., Kirk, C. (2021). Nanoflower Ni(OH)₂ grown in situ on Ni foam for high-performance supercapacitor electrode materials. *Sustainable Energy Fuels*, 5, 5236-5246. DOI: 10.1039/D1SE01036K.
- Yu, X., Cao, C. (2008). Photoresponse and field-emission properties of bismuth sulfide nanoflowers. *Crystal Growth and Design*, 8(11), 3951-3955.
- Yucheng, L., Jinyang, C., Mingyuan, D., Xinxin, W., Xinghu, J., Zhike, H. (2017). The preparation of dual-functional hybrid nanoflower and its application in the ultrasensitive detection of disease-related biomarker. *Biosensors and Bioelectronics*, 92, 68-73.
- Zhang, H., Chen, B., & Banfield, J. F. (2010). Particle size and pH effects on nanoparticle dissolution. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(35), 14876-14884.
- Zhang, N., Yi, R., Shi, R., Gao, G., Chen, G., Liu, X. (2009). Novel rose-like ZnO nanoflowers synthesized by chemical vapor deposition. *Materials Letters*, 63, 496-499.
- Zhang, Y., R Nayak, T., Hong, H., & Cai, W. (2013). Biomedical applications of zinc oxide nanomaterials. *Current molecular medicine*, 13(10), 1633-1645.
- Zhang, Y., Zeng, W. (2017). New insight into gas sensing performance of nanoneedle-assembled and nanosheet-assembled hierarchical NiO nanoflowers. *Materials Letters*, 195, 217-219.
- Zhao, L., Ji, X., Sun, X., Li, J., Yang, W., Peng, X. (2009). Formation and stability of gold nanoflowers by the seeding approach: the effect of intraparticle ripening. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(38), 16645-16651.