



Editorial Universidad de Antioquia

Nanotecnología

Fundamentos y aplicaciones

Mónica Lucía Álvarez-Láinez
Hader Vladimir Martínez-Tejada
Franklin Jaramillo Isaza
—editores académicos—

Ciencia y Tecnología



Editorial Universidad de Antioquia

Nanotecnología

Fundamentos y aplicaciones

Mónica Lucía Álvarez-Láinez
Hader Vladimir Martínez-Tejada
Franklin Jaramillo Isaza
—editores académicos—

Ciencia y Tecnología

Nanotecnología

Fundamentos y aplicaciones

Mónica Lucía Álvarez-Láinez

Hader Vladimir Martínez-Tejada

Franklin Jaramillo Isaza

—editores académicos—

Ciencia y Tecnología

Editorial Universidad de Antioquia®

Colección *Ciencia y Tecnología*

© Mónica Lucía Álvarez-Láinez, Hader Vladimir Martínez-Tejada, Franklin Jaramillo Isaza

© Editorial Universidad de Antioquia®

ISBN: 978-958-714-897-8

ISBNe: 978-958-714-898-5

Primera edición: junio del 2019

Motivo de cubierta: Nanopartículas programadas para realizar transporte y entrega controlada de medicamentos. Imagen tomada con un microscopio electrónico de transmisión. Fotografía de Edgar Emir González Jiménez

Hecho en Colombia / Made in Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Universidad de Antioquia®

Editorial Universidad de Antioquia®

(574) 219 50 10

editorial@udea.edu.co

<http://editorial.udea.edu.co>

Apartado 1226. Medellín, Colombia

Imprenta Universidad de Antioquia

(574) 219 53 30

imprenta@udea.edu.co

Los autores

Adriana María Restrepo Osorio. PhD. Grupo de Investigación Nuevos Materiales (GINUMA), Semillero de Investigación Ingeniería Textil, Facultad de Ingeniería Textil, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Alba Graciela Ávila-Bernal. PhD. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá.

Ana Elisa Casas Botero. PhD. Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), Semillero de Investigación Ingeniería Textil, Escuela de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Angélica María Serpa Guerra. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Beatriz Eugenia Campillo Vélez. Grupo de Investigación en Ética y Bioética, Instituto de Humanismo Cristiano, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Beynor Antonio Páez Sierra. Departamento de Física, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

Catalina Gómez Hoyos. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

César Augusto Sierra Ávila. PhD. Grupo de Investigación de Macromoléculas, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Cristina Isabel Castro Herazo. PhD. Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales (GINUMA), Facultad de Ingeniería Textil, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Diana Catalina Marín Quintero. Grupo de Ecomateriales, Instituto Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales (Intema), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

Diana Marcela Marín-Pineda. MSc. Grupo de Ecomateriales, Instituto Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales

(Intema), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

Edgar Emir González Jiménez. Grupo de Nanociencia y Nanotecnología, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Felipe Muñoz-Giraldo. PhD. Grupo de Diseño de Productos y Procesos, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá.

Félix Echeverría Echeverría. Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (Cidemat), Universidad de Antioquia, Medellín.

Franklin Jaramillo Isaza. Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (Cidemat). Sede de Investigación Universitaria (SIU), Universidad de Antioquia, Medellín.

Freddy Rafael Pérez. Grupo de Investigación en Óptica y Espectroscopía. Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Guillermo León Zuleta Salas. Grupo de Investigación en Ética y Bioética (GIEB), Facultad de Teología, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Gustavo Antonio Peñuela Mesa. PhD. Grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Sede de Investigación Universitaria (SIU), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín.

Hader Vladimir Martínez-Tejada. Profesor Titular. Facultad de Ingeniería Mecánica, GINUMA-GET, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Herbert Enrique Kerguelen Grajales. Grupo de Investigación Nuevos Materiales (GINUMA), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Homero Fernando Pastrana Rendón. PhD. Grupo de Investigación de Microelectrónica (CMUA), Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá.

Jorge Velásquez-Cock. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Juan Felipe Santa Marín. Grupo de Investigación Materiales Avanzados y Energía (MATYER), Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín.

Lina María Vélez-Acosta. MSc. Grupo de Investigaciones

Agroindustriales (GRAIN), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Mabel Milena Torres Taborda. MSc. Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Marlon Andrés Osorio Delgado. PhD. Grupo de Investigación en Biología de Sistemas, Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales (GINUMA), Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Mauricio Arroyave-Franco. MSc Grupo de Investigación en Electromagnetismo Aplicado, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Eafit, Medellín.

Mónica Lucía Álvarez-Láinez. PhD. Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño de Producto (GRID), Escuela de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín.

Pablo Marcelo Stefani. PhD. Grupo de Ecomateriales, Instituto Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales (Intema), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

Piedad Felisinda Gañán-Rojo. PhD. Grupo de Investigación Nuevos Materiales (GINUMA), Facultad de Ingeniería Textil, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Robin Octavio Zuluaga Gallego. PhD. Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales (GINUMA), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Robinson Buitrago Sierra. Grupo de Investigación Materiales Avanzados y Energía (MATYER), Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín.

Introducción

Las tecnologías disruptivas dan amplia cuenta del poder que tiene la innovación para mejorar la calidad de vida, transformar las industrias y salvaguardar el planeta. Desde el punto de vista del denominado desarrollo sostenible, tanto las esferas sociales, ambientales y económicas como aquellas que resultan de su intersección (socioambiental, económico-ambiental y socioeconómica) deben operar de manera consistente, en especial en el contexto actual de la historia, en el que las tecnologías disruptivas han adquirido una creciente relevancia. Aunque por lo general las tecnologías disruptivas son asumidas como nuevas, también pueden abarcar viejas tecnologías o tecnologías que son relativamente controversiales, que no han alcanzado un desarrollo pleno o que no poseen un único campo de aplicación. Entre estas tecnologías pueden mencionarse la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la robótica, la manufactura aditiva y la nanotecnología. Esta última tecnología, que no es nueva, pero sí relativamente controversial, que no ha alcanzado un pleno desarrollo y tiene aplicación en numerosos campos, es precisamente el objeto de este libro, al que hemos denominado *Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones*.

Más que explicar fundamentos teóricos, el presente libro busca hacer posible que el lector pueda acercarse al sentido del diseño y la manipulación de la materia a nivel de átomos o moléculas, los cuales, por demás, desde diferentes áreas del conocimiento, están habilitando aplicaciones e impactando diferentes industrias.

Antes de entrar en materia, conviene mencionar los antecedentes que fundamentaron la escritura de este texto, el cual es el resultado tanto del esfuerzo interdisciplinario de una comunidad comprometida con llevar el conocimiento y las aplicaciones relacionadas con la nanotecnología a diferentes ámbitos, como de la recopilación del valioso aprendizaje que ha surgido desde el año 2000, en estrecha relación con la comunidad científica, empresarial y estatal, gracias a una serie de condiciones en los contextos científico, económico y político de orden mundial.

En los últimos veinte años, el número de publicaciones relacionadas con la nanotecnología muestra una tendencia creciente, con cambios

significativos. En general, desde sus orígenes, la nanotecnología se había enfocado en la física de materiales y en estudios básicos de la química y la ingeniería aplicada; sin embargo, el establecimiento de la National Nanotechnology Initiative (NNI) en el 2000 en Estados Unidos supuso que durante los siguientes años tuviera lugar en muchos países no solo la apropiación de investigaciones en nanociencias y nanotecnología (N&N) en diferentes grupos de investigación en el mundo y en Colombia, sino también la generación de intereses compartidos, desde la academia y la industria, ligados al creciente —aunque todavía insuficiente— número de recursos globales destinados a la investigación.

En Colombia, a partir del mismo año, el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT) comenzó a utilizar el indicador de actividades de ciencia, tecnología e innovación (ACTI) para medir la innovación, y en este incluyó la nanotecnología. Para el 2004, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) seleccionó ocho áreas estratégicas para el desarrollo de la productividad y la competitividad del país, dentro de las cuales se encontraban los materiales avanzados y la nanotecnología. Ese año, como una política derivada del Departamento Nacional de Planeación, se generó el documento “Colombia 2019”, que consideró la N&N como una de las áreas estratégicas para el desarrollo del país. Dos años más tarde, el concepto de innovación tomó mayor forma, mediante la expedición del Decreto 2828 y el documento Conpes 3439, sobre la institucionalidad y los principios para la productividad y competitividad nacional, por medio de los cuales se creó el Sistema Nacional de Competitividad (SNC), a cuyo nombre más tarde se le agregó la palabra innovación (SNCI). En el mismo año tuvo lugar el Simposio Nacional de Nanotecnología, el cual enfatizó en la apropiación de la N&N como una ventaja competitiva, en función de la biodiversidad y del abanico de recursos naturales renovables y no renovables del país. Simultáneamente, el simposio señaló la aplicación y el uso de la nanotecnología como un mecanismo que permitiría apoyar el crecimiento económico.

En este punto, el ámbito de la nanotecnología, en particular en Colombia, ha permitido de manera singular el acercamiento entre académicos, empresarios, emprendedores y demás actores que observan oportunidades diversas en un país que continúa apostando por la ciencia y la tecnología

como la mejor herramienta para dirigirse de manera segura hacia el desarrollo, a diversificar al máximo sus exportaciones y a procurar incrementarles el valor añadido a los diversos recursos que por décadas han sido la principal base de su sustento económico.

En este sentido, *Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones* recoge los aportes hechos por académicos desde diferentes instituciones de educación superior en Colombia, en quienes hemos encontrado una motivación común para exponer diferentes aspectos básicos alrededor de esta disciplina, que aun con su connotación de disruptiva, resulta cada vez menos ajena a la industria y a la sociedad en general.

Esta obra está pensada tanto para personas interesadas en ciencia e ingeniería que tengan conocimientos en ciencias básicas, matemáticas, física y química, como para estudiantes universitarios de ingenierías, ciencias básicas y áreas afines.

Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones se divide en dos secciones. La primera, de fundamentos, abarca desde el capítulo 1 hasta el 5. En el de apertura, se describen los significados, logros y posibilidades alrededor de la N&N. En el capítulo 2, se explican las herramientas, las formas y los medios de síntesis referidos a materiales y sistemas nanoestructurados. El capítulo 3 se refiere consecuentemente a herramientas para “ver” y “modificar” el mundo nano, y hace especial énfasis en técnicas analíticas comunes para la caracterización morfológica, composicional y funcional de nanomateriales. El capítulo 4, por su parte, merece especial atención en el marco de oportunidades comerciales, en tanto hace énfasis en la regulación y normatividad existente sobre nanotecnología, enlazándose con el capítulo 5, el cual aborda el futuro de la normalización en el marco de la bioética y la búsqueda por una nanotecnología responsable.

La segunda sección, sobre la aplicación de la nanotecnología en diferentes campos de acción, está dirigida a lectores más especializados, que cuenten con un nivel previo de conocimiento. El capítulo 6, por ejemplo, versa sobre la nanocelulosa, una estructura que, además de ser producida por la naturaleza, resulta de elevado valor tecnológico en virtud de sus propiedades físicas y mecánicas y especialmente por su abundancia, como principal constituyente de formas naturales. Por otro lado, en el capítulo 7, se revisan las oportunidades y los retos alrededor de la microelectrónica y la nanoelectrónica, que han sido identificados desde el establecimiento de la

N&N en muchos de los sistemas electrónicos que observamos cotidianamente. El capítulo 8 se centra en las aplicaciones y el estado actual de algunas de las principales tecnologías energéticas basadas en nanomateriales. El capítulo 9, acerca de nanotecnología textil, resulta de especial interés, sobre todo en un país como Colombia, en el que esta industria ha gozado de escenarios ideales en años previos, y que hoy se enfrenta a la competencia en clave de diferenciación con respecto a productos foráneos, y donde la nanotecnología emerge como promesa de un campo por explorar, para continuar fortaleciendo uno de los sectores con mayores impactos en cuanto al diseño, la confección y la moda en el país.

Siguiendo esta línea, sectores estratégicos y tradicionales en Colombia, como la agroindustria, no se dejan de lado. El capítulo 10 se dedica entonces a este segmento, al demarcar alternativas para continuar apostando y promoviendo el desarrollo del sector agro. Consecuentemente, el agua y el aire siempre están presentes en cualquier discusión que surja alrededor de la nanotecnología; entre otras razones, porque la N&N poseen un rol fundamental en la producción (sostenible) de energía, y porque, además, gran parte de la atención actual en investigación está enmarcada en la remediación y el mejoramiento del agua y el aire como medios vitales, tal como se expone en el capítulo 11. El último capítulo, el 12, trata los aspectos de riesgos y seguridad asociados al uso de nanotecnología, y revisa como ejemplos tanto el tratamiento de nanotubos de carbono como los riesgos que entraña un contacto potencial o la inhalación de nanomateriales; este capítulo está, pues, relacionado con el manejo seguro, el etiquetado y el almacenamiento de sustancias y materiales nanoestructurados.

Finalmente, los editores de este libro agradecen la participación entusiasta, colaborativa e interdisciplinaria de los autores de los diferentes capítulos aquí incluidos. Es a ellos, investigadores, colegas y profesores en diferentes instituciones de educación superior en Colombia, y especialmente a nuestros alumnos y futuros transformadores de la realidad, a quienes está dedicado este libro.

Los editores

Sección 1. Fundamentos

1. Nanociencia y nanotecnología: significado, logros y posibilidades

Edgar Emir González Jiménez

1.1 Introducción

La nanociencia y la nanotecnología se perfilan como los campos de mayor impacto en la transformación de la sociedad que transita los comienzos del siglo XXI. Aunque ya se han alcanzado importantes logros en el control y la manipulación de la materia en la macro, la micro y la nanoescala, aún se proyectan imponentes desarrollos que permitirán viabilizar el diseño y la fabricación de dispositivos y sistemas con capacidad de autoensamblado y autoorganización, todo esto dentro de un contexto de imitación biológica. En consecuencia, el objetivo de este capítulo es presentar las principales definiciones de nanociencia y nanotecnología, sus orígenes y evolución, y los principales retos frente a esta nueva rama de la ciencia.

Cada vez se afianza más el ideal de realidad tecnológica para una materia programable, adaptativa y evolutiva, que será el recurso para la confección de los productos tecnológicos del futuro, así como del diseño y la aplicación de soluciones a los grandes problemas que debe afrontar la sociedad del actual siglo.

La nanociencia, involucrada con el estudio de la fenomenología de la naturaleza a nivel nanoescalar, y la nanotecnología,¹ con su propuesta pragmática de control y manipulación a ese mismo nivel, han resultado de la orientación del conocimiento a la intimidad de la materia y de la energía, a escalas en donde tienen lugar los procesos y componentes fundamentales que soportan la estructura y el comportamiento de toda la naturaleza existente. Es allí, en el nanocosmos, en donde se produce el milagro de la vida, el autoensamblado de estructuras biológicas complejas, la reproducción, la autorreparación, la adaptación y, en la cumbre de la manifestación de la complejidad de la naturaleza, la emergencia. *Nano* hace

referencia a escalas del orden de 10^{-9} metros, una milmillonésima parte del metro. Cuando los átomos y las moléculas se asocian para formar entidades en escalas cercanas al nanómetro, entidades que se pueden denominar nanoobjetos, los comportamientos de estas entidades van a ser muy sensibles no solamente al tipo de átomos que las constituyen, sino a la manera como se organizan arquitectónicamente y, ante todo, al tamaño que poseen^[1-2]. Esta dependencia del comportamiento físico y químico con la composición, la forma y el tamaño es uno de los principales diferenciales que poseen los nanoobjetos con respecto a los cuerpos que pertenecen a nuestra escala de interacción, a los cuales se les puede denominar macroobjetos. Propiedades tales como la conductividad eléctrica, la elasticidad, la capacidad calorífica, la dispersión y absorción de la luz, entre muchas otras, son drásticamente modificadas por cambios en los tres aspectos mencionados. Esto hace que en la escala nanométrica el comportamiento de la materia sea novedoso y de trascendental importancia para potenciales aplicaciones y usos.

De otra parte, en los nanoobjetos, el número de átomos que se encuentra en la superficie, con respecto al número de átomos que ocupa el volumen, se hace cada vez mayor a medida que se reduce el tamaño. En trozos de materia cercanos a unos pocos nanómetros, el valor de superficie es mayor que el del volumen y unos pocos átomos pueden hacer diferencia. Esto tiene una gran importancia en el comportamiento de la materia a escalas nanométricas. Gran parte de las interacciones ocurren en superficies y es allí donde se “programan” muchas de las propiedades de los nanoobjetos. Así, por ejemplo, en el extraordinario fenómeno de la vida, procesos involucrados con transporte, reconocimiento, ensamblado, intercambio, entre otros, se producen en, y a través de, superficies. No existe ninguna fuente de metáfora de mayor riqueza que aquella que ofrece la naturaleza biológica, y es tarea de la nanociencia desarrollar los recursos de tipo teórico, experimental y computacional, que permitan una progresiva tarea de imitación e integración a una naturaleza que, sin lugar a dudas, es nanotecnología que trabaja.

En el presente capítulo se abordan, entonces, los antecedentes de la nanotecnología, con el fin de identificar cómo ha sido la evolución de la ciencia y la tecnología de materiales hacia la nanociencia y la

nanotecnología. Debido a que esta es reconocida como una de las tecnologías clave para la economía del siglo XXI, se hace un análisis teniendo en cuenta la teoría de los ciclos dinámicos largos, la cual establece sus trayectorias como olas, y se identifica el ciclo de la nanotecnología como la sexta ola. Al finalizar este capítulo se podrán encontrar los principales retos, logros y beneficios que se han alcanzado en los últimos años.

1.2 Antecedentes y significado de la nanotecnología

En la historia de la humanidad aparece como eje central —en torno al cual ha evolucionado la sociedad— la capacidad de manipulación y utilización de los materiales. Hace un poco más de dos millones de años, en la denominada Edad de Piedra, este valioso material, así como el hueso, la madera y el barro, se convirtieron en el sustrato sobre el cual los homínidos empezaron a desarrollar destrezas para diseñar y construir herramientas, y así modificar la naturaleza. Este acto creativo dio inicio a la transición de una actividad depredadora hacia una actividad productiva.

Posterior a la Edad de Piedra aparecen la Edad de los Metales, específicamente del cobre y del bronce, y la Edad de Hierro. Es una etapa de desarrollo tecnológico que involucra materiales más refinados que los utilizados en la Edad de Piedra, ocurre cinco mil años antes de nuestra era y da lugar a la metalurgia^[4]. El cobre fue el primer mineral que a través del forjado en frío y posteriormente con la fundición mejoró notablemente la calidad y la eficiencia de las herramientas y utensilios. Con el uso de estaño se logró obtener el bronce, una aleación de gran utilidad en la construcción de armas y la reorganización de la estructura social y económica. La Edad de Hierro empieza a finales del segundo milenio antes de nuestra era y cobra vida con las capacidades siderúrgicas de obtener temperaturas cercanas a los 1.300 °C.

El perfeccionamiento a lo largo de los siglos de los procesos de obtención del hierro dio lugar durante el siglo XVI a la aparición del acero. En 1885, el ingeniero británico Henry Bessemer inventó el proceso para el refinado del acero en cantidades industriales a partir de hierro. Esto marcó un hito en la consolidación de la Revolución Industrial, ya que proporcionaba un material idóneo para los requerimientos de la época.

Con el uso de celulosa, almidón, resina, lignina y seda, entre otros, se da el nacimiento de la Edad de los Polímeros. En el siglo XVIII, el inventor estadounidense John Wesley, motivado por la búsqueda de un material que sustituyera al marfil en la producción de bolas de billar, fabricó a partir de la celulosa el primer plástico. Luego aparecieron el celuloide, la seda artificial, el celofán, la baquelita y las macromoléculas que forman parte de la química moderna de los plásticos.

Una de las edades de mayor trascendencia en el desarrollo de la actual tecnología es, sin lugar a dudas, la del silicio. El silicio es uno de los elementos químicos más abundantes en la corteza terrestre, después del oxígeno. Este material, que transformó dramáticamente la sociedad del siglo XX, aún mantiene su vigencia, especialmente, en el área de la microelectrónica.

Al traer hasta el presente esta breve descripción que dibuja la línea evolutiva por la que ha transitado la humanidad (ver figura 1.1), se hace posible hablar de una *edad de los nanomateriales*, la cual se origina en la denominada *era nanotecnológica*.

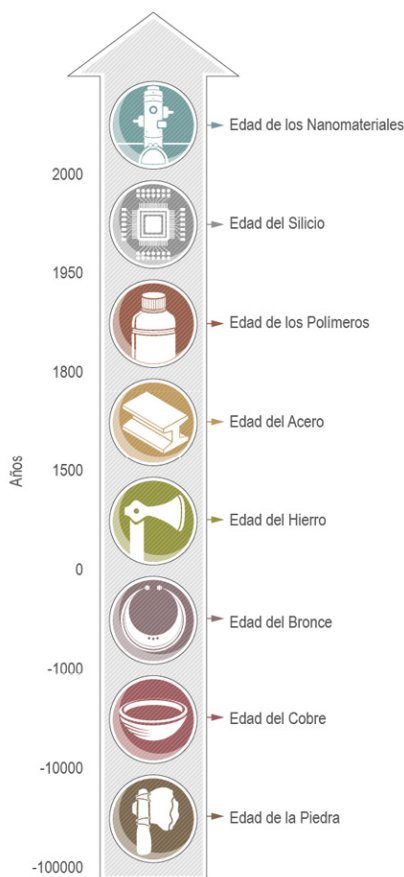


Figura 1.1 Línea evolutiva de la humanidad marcada por las edades de tránsito de los materiales

En 1980, con el desarrollo instrumental diseñado para explorar y caracterizar la materia a escala de los nanómetros, se abre una ventana hacia el estudio y la manipulación de la materia, que permiten desvelar las extraordinarias y novedosas propiedades que se hacen manifiestas al mirar en estos tamaños invisibles. En ese momento cobran vigencia áreas de la química tales como la “dimensión olvidada” de la ciencia de los coloides, que adquiere una nueva imagen y denominación que es valorizada con el prefijo *nano*:-² las *nanopartículas*. Se inicia entonces la transición hacia los dominios de validez de la mecánica cuántica, fundamento teórico de la nanociencia, la cual permite dar cuenta de las observaciones y resultados experimentales que la originan en los laboratorios de investigación. Desde los trabajos visionarios de Richard Feynman y de los avances tecnológicos de Leo Esaki, creador del diodo túnel o diodo Esaki, que es la primera nanoestructura fabricada, se recuperan viejos problemas con nuevas soluciones planteadas a partir de la nanoescala, que da lugar a una enorme y

vasta cantidad de publicaciones y avances científicos y tecnológicos en todas las áreas del conocimiento. Es esta una edad de grandes cambios y de nuevas miradas a problemas que forman, y que han formado, parte del estudio de la materia a lo largo de todas las edades.

1.2.1 Evolución de la ciencia y tecnología de materiales hacia la nanociencia y la nanotecnología

La ciencia e ingeniería de materiales aparece en los Estados Unidos a comienzos de la década de los cincuenta del siglo xx, y en Europa a comienzos de la década de los sesenta, impulsada por la academia y por la industria, como resultado de la conversión progresiva de la metalurgia. Desde ese entonces ha evolucionado hasta convertirse en una “superdisciplina” que sustenta la infraestructura en investigación y desarrollo tecnológico.

En el reporte de 1974 del COSMAT (Committee on the Survey of Materials Science and Technology), la ciencia e ingeniería de materiales se define como: “Generación y aplicación del conocimiento relativo a la composición, estructura y procesamiento de materiales, sus usos y propiedades”^[5]. En esta definición, que incluye los principales elementos que dimensionan el significado de la ciencia e ingeniería de materiales, los términos “composición” y “estructura” han cobrado gran relevancia en los últimos años dentro del contexto de control en la escala nanométrica. En esta perspectiva adquiere significado la evolución de ciencia e ingeniería de materiales hacia ciencia e ingeniería de nanomateriales, esencia de la transición hacia la era nanocientífica y nanotecnológica.

Una línea evolutiva para los nanomateriales puede ser trazada en términos de cinco generaciones de avances registrados en la producción o síntesis controlada de aquellos aspectos que determinan las propiedades fisicoquímicas y los comportamientos fenomenológicos propios de estos objetos nanoescalares. Siguiendo la línea de clasificación evolutiva sugerida por W. Parak, y específicamente para el caso de nanomateriales coloidales^[6], podrían ser considerados nanomateriales de primera generación aquellos en los que se hace posible controlar la sustancia o materia prima a partir de la cual se confecciona el nanomaterial. En los nanomateriales de segunda generación se logra el control en el tamaño,

aspecto que resulta de gran importancia en el comportamiento fisicoquímico. En la tercera generación se consigue control en la forma, uno de los aspectos de mayor complejidad en los procesos de síntesis y escalado. La posibilidad de lograr estructuras geométricamente controladas abre una ruta de extraordinarias posibilidades para lograr avances significativos en sus aplicaciones y usos^[7]. Los nanomateriales de cuarta generación serían aquellos en los que se logra el control en la composición; en la actualidad se cuenta con desarrollos sintéticos que permiten afinar con elevada precisión la distribución controlada de diferentes elementos químicos en nanoestructuras coloidales^[8].

Finalmente, como nanomateriales de quinta generación se podrían considerar aquellos en los que se logra el control simultáneo de la sustancia, el tamaño, la forma y la composición (ver figuras 1.2a y 1.2b)^[9].

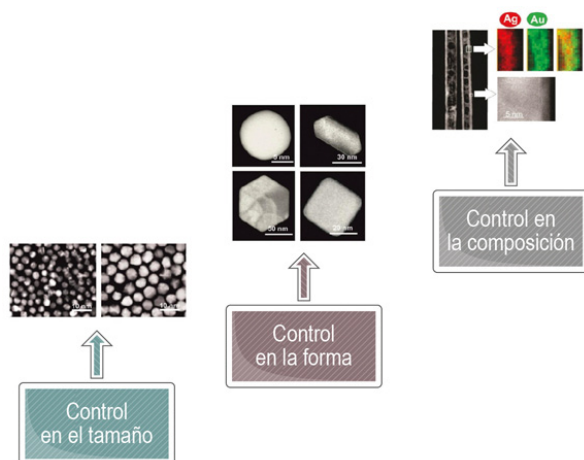


Figura 1.2a Las propiedades de la materia a escala nanométrica dependen sensiblemente de aspectos tales como la forma, el tamaño y la composición

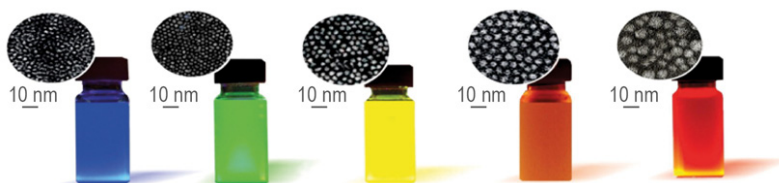


Figura 1.2b Se ilustran viales con puntos cuánticos en dispersión coloidal, y las correspondientes fotografías tomadas con microscopio electrónico de transmisión. Como se observa, la longitud de onda de la luz dispersada depende drásticamente del tamaño de estas entidades

1.2.2 Nanomateriales y su significado

Un significado de nanotecnología derivado del Subcomité NSET (Nanoscale Science, Engineering and Technology) que ha alcanzado hasta ahora el mayor consenso global, se circunscribe en: “Investigación y desarrollo tecnológico en longitudes de un rango aproximado de 1 a 100 nanómetros, para proporcionar una comprensión fundamental de los fenómenos y materiales en la nanoescala [...]”^[10]. En este contexto, la nanotecnología se restringe en términos de nanomateriales, los cuales requieren de una definición o precisión sobre su significado.

La búsqueda de una definición consensuada para los nanomateriales ha sido una tarea de permanente debate que a finales de la segunda década del siglo XXI se mantiene vigente. Algunos aspectos que resultan relevantes en este debate tienen que ver con consideraciones relacionadas con el riesgo y la seguridad en seres vivos y ambiente^[11], atributos asociados a diversos significados, y con las dificultades para establecer los rangos de tamaño que permitan validar sin ambigüedad los diferenciales identificados para los nanomateriales. En las definiciones que se han propuesto —con estatus regulatorio o de recomendación— por parte de gobiernos, organizaciones e industria, requeridas por la creciente necesidad de consolidación de marcos regulatorios y normativos para su uso y comercialización, se destaca el tamaño como elemento diferencial para delimitar su definición^[12]. Así, la ingeniería de nanopartículas se suele considerar como producción de materiales particulados que presentan un tamaño característico en el rango de 1 a 100 nm^[13].

En la figura 1.3, se aprecian fotografías de materiales con diferentes morfologías.

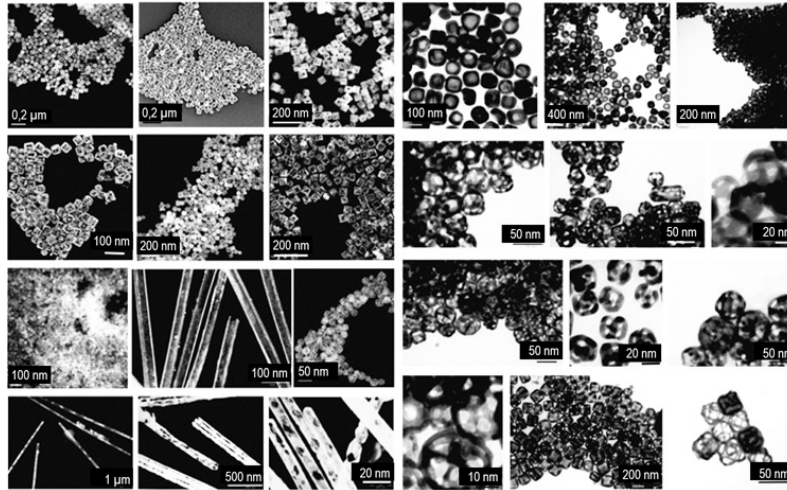


Figura 1.3 Fotografías tomadas con microscopio electrónico, de nanomateriales con diferente morfología, tamaño, composición y forma. Se muestran distintas clases de nanopartículas esféricas, cúbicas, huecas y porosas

Fuente: González, Arbiol y Puentes.^[9]

La iniciativa de la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA), luego de lanzar en junio del 2017 el Observatorio de Nanomateriales, como recurso digital para proporcionarles a los interesados información relevante relacionada con los nanomateriales, como usos, seguridad, reglamento, actividades internacionales, investigación e innovación, hace referencia a las recomendaciones que la Comisión Europea ha suministrado sobre cómo definir un nanomaterial con base: “Únicamente en el tamaño de las partículas constituyentes de un material, sin atender al peligro o al riesgo”^[14]. Esta definición, que incluye materiales naturales y manufacturados, “respalda la aplicación de disposiciones reglamentarias para este grupo de materiales. No obstante, en algunos ámbitos legislativos, la razón de las obligaciones legales ligadas a los nanomateriales es que pueden tener propiedades distintas de las partículas más grandes”^[14].

Es importante anotar que, para una definición de nanomaterial, además del tamaño, son importantes otros elementos clave que resultan de gran valor y pertinencia, tales como la masa, el área superficial (escalables), los efectos de confinamiento y las propiedades ópticas y catalíticas (no escalables), entre otros.

1.3 Nanotecnología, la sexta ola

La nanotecnología se reconoce como una de las tecnologías esenciales para la economía del siglo XXI. La economía, además de ser beneficiaria de esta transición hacia la tecnología de la nanoescala, se convierte en una de las principales fuentes de sostenimiento y viabilidad de esta tecnología emergente. Algunos estudiosos defienden la teoría económica de tránsito de la sociedad productiva, a través de ciclos de expansión, estancamiento y recesión, en los que las tecnologías emergentes y la innovación juegan un papel primordial.

El economista ruso Nikolái Kondratieff formuló en 1935 la teoría del ciclo económico largo^[15], que establece que la economía sigue la trayectoria de ciclos dinámicos de largos períodos o de olas que pueden abarcar intervalos de entre cuarenta y sesenta años, y en los cuales existe un crecimiento económico rápido al que le sigue un estancamiento y, finalmente, una recesión. Según esta teoría, cada ola está definida por un conjunto determinado de tecnologías y prácticas sociales perfectamente diferenciables para esa ola, que dan lugar a una revolución industrial. El período de transición entre una ola y otra favorece al mercado con la aparición de nuevos tipos de innovación y de materiales que constituyen los cimientos para que surja la siguiente ola.

Hasta comienzos del presente siglo se habían identificado cinco olas, o cinco ciclos de Kondratieff. En la primera ola, que tuvo lugar entre el siglo XVIII y mediados del XIX, el *algodón* jugó un papel importante como materia prima para consolidar la revolución industrial textil. Con la incorporación de las máquinas a la producción de bienes de consumo, y la existencia de grandes plantaciones de algodón, se introdujeron importantes innovaciones en los procesos de manufactura de tejidos e hilados. En 1733, el inglés John Kay inventó la lanzadera volante, un instrumento que incrementó notablemente la eficiencia de los telares.

El *carbón* y el *hierro* fueron los materiales esenciales para la consolidación de la segunda ola. En la segunda mitad del siglo XIX, el escocés James Watt le hizo innovaciones a la máquina de Newcomen, o máquina de vapor atmosférica, y como resultado creó la máquina de vapor de agua, componente esencial para la Revolución Industrial. Por su parte, el ingeniero británico George Stephenson construyó en 1825 una locomotora de vapor para el tren de Stockton y Darlington, que mejoraba notablemente

el diseño de la primera locomotora de vapor construida algunos años antes por Richard Trevithick. Estos grandes avances tecnológicos impulsaron la segunda ola y la llevaron a su máxima expansión, y el carbón y el hierro fueron los materiales sobre los que se cimentó este crecimiento.

A finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, una revolución industrial se produjo a raíz de una serie de innovaciones tecnológicas que permitieron el desarrollo de las industrias químicas y de la energía eléctrica; el ingrediente fundamental para esta tercera ola de Kondratieff fue el *acero*.

La cuarta ola se identifica con el uso del *petróleo* como fuente de energía y como insumo para el desarrollo de nuevos materiales sintéticos. En ella se introdujo el motor de combustión interna, se desarrolló el aeroplano y se inició la producción comercial del automóvil. Dentro del conjunto de tecnologías e innovaciones de esta ola tiene lugar además la invención del teléfono.

La quinta ola de Kondratieff se caracteriza por la revolución de la microelectrónica, las telecomunicaciones y las tecnologías de la información. El *silicio* es el material protagonista en esta quinta revolución industrial. En 1971, la compañía Intel lanzó el primer microprocesador, que dio paso al desarrollo del computador personal. Los circuitos integrados se incorporaron a una vasta variedad de dispositivos y tecnologías que originaron la red global de comunicaciones, el internet. Esta es quizá una de las olas que más ha impactado a la sociedad.

Actualmente se debate si la sexta ola está sustentada en la nanotecnología. Se empieza a aceptar que son los *nanomateriales* la base que está consolidando las condiciones para que tenga lugar el sexto ciclo de Kondratieff (ver figura 1.4). Esto nos lleva a preguntarnos si la nanotecnología corresponde a un hecho revolucionario o, simplemente, a uno evolucionario. Es una reflexión que cobra gran importancia en la tarea de establecer su verdadero significado y su papel en el desarrollo del conocimiento humano. Si la nanotecnología es la responsable de la sexta ola, dentro del contexto de validez de la teoría del ciclo económico largo, su papel será esencial para el desarrollo económico de la sociedad del siglo XXI. La innovación y el desarrollo tecnológico que producirían la expansión y el crecimiento en este ciclo serían extraordinariamente fértiles y de imponentes consecuencias en todos los ámbitos del saber y el quehacer humano.

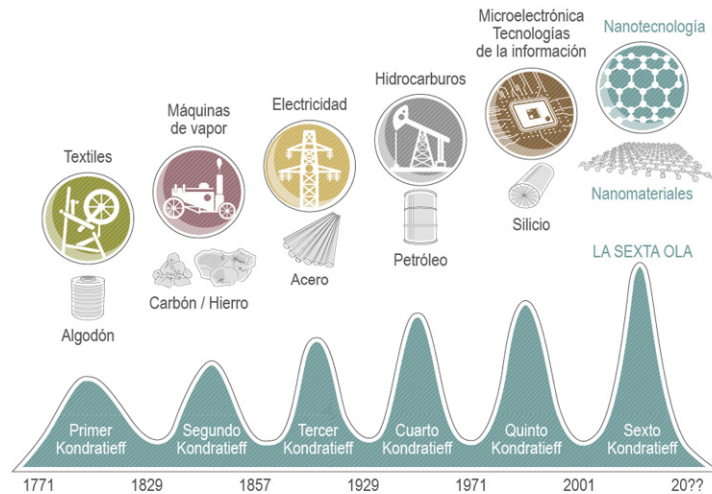


Figura 1.4 Olas o ciclos de Kondratieff. Se debate si la nanotecnología es la responsable de la sexta ola

Diferentes países y sectores productivos en el contexto global muestran creciente interés frente a las posibilidades que ofrecen las nanotecnologías dentro de las reglas que imponen el posible crecimiento y expansión, en caso de presentarse un sexto ciclo de Kondratieff (ver figura 1.4). Para citar un ejemplo, el *grafeno*, un nanomaterial que se está posicionando como factor clave de desarrollo e innovación para los próximos años, fue ganador en el 2013 de la convocatoria de Tecnologías Futuras y Emergentes de la Unión Europea, con una financiación de 1.000 millones de euros, una suma sin precedentes destinada a la investigación de un solo material.

Resulta pertinente traer a colación el reporte titulado “Surfeando la sexta ola”, del (FFRC)^[16], que contiene los primeros resultados teóricos basados en la revisión de estudios previos acerca de las olas de Kondratieff. En dicho reporte se presenta un análisis de las tecnologías estratégicas y los aspectos sociales que actúan como catalizadores para el cambio paradigmático en economías y sociedades, y se asumen como principales retos para el próximo ciclo los problemas ambientales y la necesidad de un modelo sustentable para el futuro.

1.4 Nanociencia y nanotecnología: ¿evolución o revolución?

Un aspecto ya mencionado con respecto a la nanociencia y la nanotecnología que requiere reflexión y análisis es si su naturaleza es de carácter evolucionario o revolucionario.

Según los lineamientos trazados por el historiador y filósofo estadounidense T. S. Kuhn, “ciencia normal significa investigación basada firmemente en una o más realizaciones científicas pasadas, realizaciones que alguna comunidad científica particular reconoce, durante cierto tiempo, como fundamento para una práctica posterior”^[17]. Un término que se relaciona estrechamente con la ciencia normal es el de *paradigma*,³ el cual corresponde a aquellos compromisos compartidos por una comunidad de científicos, quienes tienen una concepción común de lo que es una ciencia y esta se halla acompañada de un conjunto de teorías que les proporcionan la metodología y la forma de dar explicación de aquellos resultados que deriven de la investigación en el respectivo campo del conocimiento. Cuando surgen ciertos problemas que no pueden ser explicados a través del paradigma en uso, se produce un desarrollo no acumulativo de episodios en donde el antiguo paradigma es reemplazado por uno nuevo. Este cambio de paradigma es el que identifica a una *revolución científica*, la cual corresponde a un cambio radical en la concepción que se tiene del mundo. La madurez que adquiere algún campo del conocimiento científico está dada por la aceptación de un paradigma que debe darse en consenso por la comunidad científica, y aparece reflejado en los textos de estudio y las publicaciones reconocidas dentro de la ciencia normal. Es, pues, en el cambio de paradigma donde se producen crisis que dan lugar a nuevas teorías. La teoría cuántica, por ejemplo, responsable de la construcción de una nueva concepción del universo físico en lo fundamental, y las teorías de Einstein, producto de una ruptura con los paradigmas de la ciencia newtoniana, fueron dos de las grandes revoluciones que afectaron a la ciencia física en el siglo xx.

Dentro del contexto de T. S. Kuhn citado anteriormente, cabe preguntar si la nanociencia corresponde a una revolución científica. En el actual estado del arte, la nanociencia aún no ha producido episodios no acumulativos que reemplacen los paradigmas existentes. En otras palabras, aún no ha generado una revolución científica; sin embargo, algunos problemas que están surgiendo al nivel de la nanoescala, y que no tienen una explicación dentro de los paradigmas existentes, pueden ocasionar una crisis que dé como resultado una revolución científica.

La suposición de que la nanociencia corresponde a una revolución del

conocimiento puede causar algunas confusiones. Resulta frecuente observar en los contenidos curriculares propuestas de cambios para introducir la enseñanza de la nanociencia como si esta estuviese alimentada por nuevas teorías.

Lo que ha ocurrido con la nanociencia es que ha tenido un tránsito evolucionario hacia escalas nanométricas, donde aparecen comportamientos novedosos y en ocasiones contraintuitivos, lo que recuerda la interpretación de los fenómenos cuánticos. Se comercializa la nanociencia como si esta no formara parte de la ciencia normal. Recordemos que los nanomateriales se están investigando a partir de las teorías de la electroquímica, la física y la química de coloides, entre otras. Cuando hacemos nanociencia, estamos haciendo física, química o biología en escalas correspondientes a los nanómetros; es decir, no nos estamos enfrentando a una nueva disciplina o área del conocimiento con sus propias teorías. Aún nos hace falta hacer una transición evolutiva hacia la mecánica cuántica, como marco de validez para una gran parte de los fenómenos que ocurren en estas escalas.

La nanotecnología podría, sí, suponer cambios de paradigma con respecto a las técnicas de manufactura e implementación de las nuevas tecnologías. Allí el término revolución podría tener cabida, aunque resulta problemática su apreciación dentro del contexto en el que han cobrado significación la ciencia normal y las revoluciones científicas. En un texto de C. Pérez se define la revolución tecnológica “como un poderoso y visible conjunto de tecnologías, productos e industrias nuevas y dinámicas, capaces de sacudir los cimientos de la economía y de impulsar una oleada de desarrollo de largo plazo”^[18]. En esta definición se expresa la teoría de las olas de Kondratieff, y, por supuesto, la nanotecnología cumple con tales criterios de revolución tecnológica.

1.5 Retos para la nanociencia y la nanotecnología

En su ensayo *Our energy challenge*, del 2003, el premio nobel R. E. Smalley menciona los diez principales problemas que deben ser asumidos por la ciencia y los gobiernos para los siguientes cincuenta años^[19]. Estos problemas son: energía, agua, alimentación, ambiente, pobreza, terrorismo y guerra, enfermedad, educación, democracia y población. No hay duda de que en esta lista se encuentran los principales retos que deben asumir la

nanociencia y la nanotecnología para los próximos años. La crisis de agua potable y de energía, la creciente contaminación del medio ambiente, la salud pública y la inocuidad alimentaria son los principales desafíos sobre los que se construye la hoja de ruta para conducir a la sociedad a unas mejores condiciones de vida y de bienestar^[20].

De esto surge entonces la siguiente pregunta: ¿Cuál es la principal tarea para conseguir soluciones a los problemas planteados? Estos problemas pertenecen a la escala macro, pero en la escala nano ocurren procesos y comportamientos de la materia y la energía que pueden contribuir de manera eficaz a su solución. Entonces, ¿cómo lograr el tránsito desde el mundo nano hacia el mundo macro conservando las propiedades que ofrece la nanoescala? Este es, pues, uno de los grandes desafíos: desarrollar procesos para escalar el volumen de producción de nanomateriales manteniendo la calidad suficiente para que sean operativos en la escala macro, pero reduciendo significativamente los costos y el impacto ambiental y en los seres vivos.

1.6 Logros y beneficios de la nanotecnología

Con el incremento de la población mundial, que para mediados del siglo XXI se estima llegará a los 9.000 millones, el consumo de recursos naturales y energéticos es cada vez más exigente. Esto plantea un serio problema de sostenibilidad y supervivencia. Como muestra de ello, una grave crisis de acceso a agua potable y a energía disponible ya se está haciendo realidad^[21].

Uno de los objetivos de la agenda de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas es reducir sustancialmente el número de habitantes con carencia de agua potable. Para alcanzar esta meta, entre otras soluciones, se proyecta la implementación de estrategias innovadoras con el uso de nanomateriales para la remoción de contaminantes tales como arsénico, mercurio, pesticidas, bacterias, virus y sales. Nanopartículas de óxido de titanio, por ejemplo, pueden degradar contaminantes orgánicos; partículas de plata eliminarían eficientemente contaminantes bacterianos; nanofiltros hechos de nanotubos de carbono o membranas nanoestructuradas crearían barreras físicas para impedir el paso de sales disueltas en el agua o eliminar contaminantes bióticos (bacterias y virus).

Así mismo, para la remoción de metales pesados, metaloides o sustancias orgánicas derivadas de los hidrocarburos, se puede hacer uso de nanopartículas magnéticas, las cuales pueden ser fácilmente capturadas con campos magnéticos externos.

Se observa, entonces, que con una cuidadosa evaluación del impacto en el medio ambiente y los seres vivos, será posible implementar soluciones económicamente accesibles y sostenibles que contribuyan eficazmente al saneamiento de los recursos hídricos^[22].

De modo similar, con la oferta de nuevos materiales y procesos nanoescalares se abre la posibilidad de desarrollar colectores de energía bioinspirados⁴ y digestores de mayor eficacia que los existentes^[23]. Con el uso de bacterias capaces de descomponer materia orgánica presente en aguas residuales, y la consecuente producción de energía, se presentan importantes alternativas para lograr, dentro de un enfoque holístico, asumir el problema de remediación de aguas contaminadas y, a su vez, producir energía útil.

En este sentido, la nanociencia y la nanotecnología jugarán un papel primordial, por el aporte de materiales de soporte para que las colonias bacterianas puedan alcanzar niveles eficientes de producción de energía a partir de los procesos de remediación del recurso hídrico.

Por otra parte, el mercado de nanosensores para la detección, medición y monitoreo de señales y agentes químicos o biológicos crece de manera exponencial. Con la implementación de nuevas tecnologías y métodos de nanofabricación, se hace posible mejorar sustancialmente la precisión y sensibilidad de estos dispositivos. Ya se han diseñado nanosensores que permiten monitorear con una gran sensibilidad procesos biológicos, identificar explosivos, hacer vigilancia ambiental, medir la concentración de contaminantes en aguas, suelos y aire, monitorear niveles de glucosa en pacientes con diabetes y hacer una detección temprana de cáncer. Mejorando, pues, la portabilidad, los costos y la detección selectiva, los nanosensores pronto alcanzarán el nivel de desarrollo suficiente para incorporarlos masivamente en procesos y actividades de investigación y desarrollo^[24-25].

En otro aspecto, la industria de la construcción está siendo drásticamente impactada por los acelerados avances en materia de nanotecnología. Ya

resulta viable el desarrollo y la implementación de recubrimientos autolimpiables para fachadas y de polímeros como barreras protectoras en carreteras, con capacidad de reparación autónoma de daños y deterioro por uso. En la figura 1.5 se presenta una imagen SEM de nanohilos recubiertos con nanopartículas de óxido de sílice *funcionalizadas* (preparadas para ser utilizables), que permiten la confección de nanomateriales superhidrófobos y con capacidad de aislamiento térmico, los cuales son estratégicos para que puedan ser implementados en la industria de la construcción.

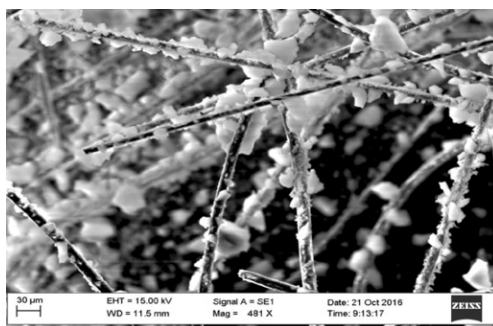


Figura 1.5 Imagen SEM de un nanohilo recubierto con nanopartículas de SiO_2 . Se muestra un nanomaterial con propiedades de autolimpieza y aislamiento térmico

Fuente: Edgar Emir González Jiménez.

Uno de los avances más sobresalientes para la industria de la construcción es el desarrollo de hormigón nanobioestructurado y autorreparable en caso de producirse agrietamiento y deterioro. Este tipo de material ya se encuentra a disposición en el mercado. El hormigón nanoestructurado se caracteriza por ser más resistente y liviano. Sus láminas son aptas para controlar el flujo térmico desde y hacia el interior de las viviendas, lo que permite mejorar sustancialmente el ahorro de energía.

Por su parte, en el área de la salud, se llevan a cabo importantes esfuerzos interdisciplinarios orientados a desarrollar nuevas estrategias y herramientas para asistir las tareas de prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades^[26]. Se destaca principalmente el desarrollo de materiales programados con funciones terapéuticas, transporte y suministro de fármacos (ver figura 1.6), localización y destrucción de células enfermas y sensores ultrasensibles. Ya se han aprobado algunas nanoterapias en seres humanos, tal como el sistema integrado MFH(R)300F para el tratamiento