

NANOTECNOLOGÍA EN LA ARQUITECTURA: UNA VISIÓN INTEGRAL EN EL USO DE NANOMATERIALES

Recibido: 20 mayo, 2024 • Revisado: 21 junio, 2024 • Aceptado: 01 julio, 2024

José Roberto Vega-Baudrit
y Karla Juárez-Moreno

RESUMEN

El presente trabajo explora el impacto transformador de la nanotecnología en el ámbito de la arquitectura y la construcción, destacando sus aplicaciones innovadoras, beneficios potenciales y desafíos asociados. La nanotecnología, mediante el desarrollo de materiales a escala nanométrica, promete revolucionar la construcción de edificaciones al mejorar significativamente su eficiencia energética, resistencia, y sostenibilidad. Los nanomateriales, con propiedades únicas como la auto reparación y la adaptabilidad ambiental, ofrecen nuevas posibilidades para diseñar edificios que no solo sean estéticamente avanzados, sino también más duraderos y amigables con el medio ambiente. Sin embargo, a pesar de estos avances prometedores, el trabajo subraya la importancia de abordar los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente que conlleva el uso de nanomateriales. Se enfatiza la necesidad de un marco regulador robusto y de prácticas éticas en la aplicación de la nanotecnología en la arquitectura, para asegurar que su implementación sea segura y sostenible. A través de un análisis exhaustivo, este estudio resalta el papel crucial de los arquitectos y profesionales de la construcción en el uso responsable de la nanotecnología, equilibrando la innovación con la responsabilidad hacia la sociedad y el planeta.

Palabras clave: nanotecnología, arquitectura, construcción, nanomateriales, sostenibilidad, eficiencia energética, autoreparación, ética, regulación, salud humana, impacto ambiental.

SUMMARY

This paper explores the transformative impact of nanotechnology in architecture and construction, highlighting its innovative applications, potential benefits, and associated challenges. Nanotechnology, through the development of materials at the nanoscale, promises to revolutionize building construction by significantly improving energy efficiency, strength, and sustainability. Nanomaterials, with unique properties such as self-healing and environmental adaptability, offer new possibilities for designing buildings that are aesthetically advanced, more durable, and environmentally friendly. However, despite these promising advancements, the paper emphasizes the importance of using nanomaterials to address the potential risks to human health and the environment. It underscores the need for a robust regulatory framework and ethical practices in applying nanotechnology in architecture to ensure its safe and sustainable implementation. Through comprehensive analysis, this study highlights the crucial role of architects and construction professionals in the responsible use of nanotechnology, balancing innovation with responsibility towards society and the planet.

Keywords: nanotechnology, architecture, construction, nanomaterials, sustainability, energy efficiency, self-healing, ethics, regulation, human health, environmental impact.

José Vega Baudrit es Director del Laboratorio Nacional de Nanotecnología LANOTEC CENAT. Es profesor de LEAD University y de la Universidad Nacional, Escuela de Química.

Karla Juárez es investigadora del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

INTRODUCCIÓN

¿Qué es nanotecnología?

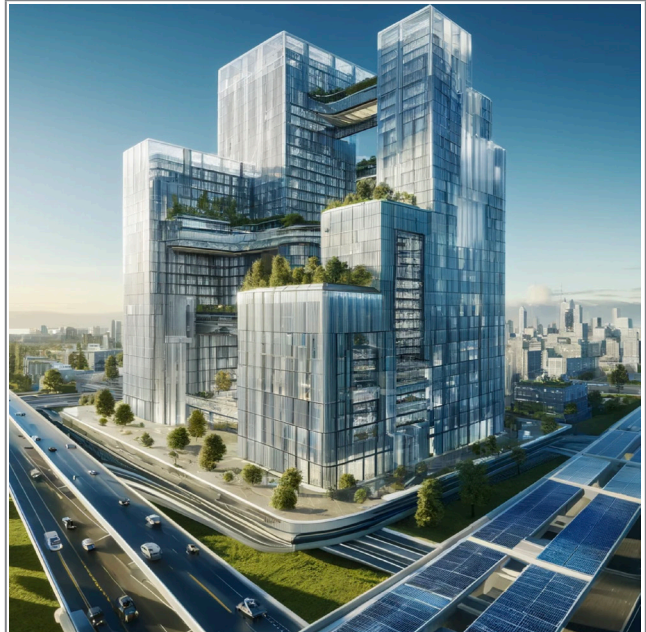
Dentro del contexto de la arquitectura y la construcción, la nanotecnología se define como la aplicación de la ciencia, la ingeniería y la tecnología a nivel nanométrico, es decir, a escalas del orden de un nanómetro (un millonésimo de milímetro). Esta tecnología permite manipular y controlar materiales a la escala más pequeña para crear estructuras, sistemas y dispositivos con propiedades y funciones nuevas y mejoradas. En la arquitectura, la nanotecnología se utiliza para desarrollar materiales avanzados que ofrecen mejoras significativas en términos de resistencia, durabilidad, eficiencia energética, y sostenibilidad ambiental. Estos materiales nanotecnológicos incluyen, por ejemplo, concretos ultra-resistentes, pinturas y recubrimientos autolimpiantes, vidrios con control solar eficiente, y paneles solares más efectivos. La capacidad de la nanotecnología para mejorar las propiedades físicas y químicas de los materiales de construcción a niveles moleculares ofrece enormes posibilidades para innovar en el diseño y la funcionalidad de los edificios, haciendo que estos sean más adaptativos, eficientes y respetuosos con el entorno.

Nanotecnología y materiales: impacto en la arquitectura.

La nanotecnología ha producido cambios significativos en varias áreas, incluyendo la arquitectura. En este momento, la incorporación de la nanotecnología en el proceso de diseño y construcción de edificios está creando nuevas oportunidades para la arquitectura contemporánea. Gracias al uso de materiales nanoestructurados, se están logrando avances destacados en eficiencia energética, sostenibilidad y funcionalidad de los edificios. (Farinango-Aules y Tenelema-Toapanta, 2024).

Específicamente, la nanotecnología posibilita la manipulación y control de la materia a nivel nanométrico, es decir, a la escala de átomos y moléculas. Este importante avance científico implica la capacidad extraordinaria de crear materiales con propiedades mejoradas y características únicas, las cuales podrían no encontrarse en los materiales convencionales a gran escala. (Torres y Quiroz, 2023; Menéndez López, 2023).

FIGURA 1. UN EDIFICIO INTELIGENTE FUTURISTA PUEDE INCORPORAR NUEVOS MATERIALES, Y POSEER O INCREMENTAR CARACTERÍSTICAS COMO LA SOSTENIBILIDAD, EFICIENCIA Y EL BIENESTAR DE SUS OCUPANTES GRACIAS AL USO INNOVADOR DE LA NANOTECNOLOGÍA



Fuente propia, 2024. Imagen creada con AI.

Los materiales nano, como los recubrimientos y adhesivos, ofrecen una amplia gama de beneficios y aplicaciones innovadoras (Figura 1). Por ejemplo, estos materiales nanotecnológicos exhiben una mayor resistencia y durabilidad que sus contrapartes convencionales, lo que tiene un impacto significativo en diversas industrias, desde la automotriz hasta la aeroespacial. No solo son más fuertes, sino que también ofrecen un aislamiento térmico excepcional, lo que garantiza un rendimiento óptimo incluso en condiciones extremas. (Muñoz Pérez *et al.*, 2021; Bermúdez-Medina y Villamil-Rojas, 2021).

Otro aspecto fascinante de la nanotecnología es su capacidad para crear superficies autorreparables y autolimpiantes. Imagine un edificio que se mantenga limpio y protegido de manera automática, sin necesidad de limpiadores químicos agresivos o mantenimiento constante. Esta innovación no solo simplifica el mantenimiento, sino que también reduce los costos asociados y promueve un entorno más sostenible. Además, el uso de materiales y recubrimientos autorreparables y autolimpiantes en la arquitectura futura puede contribuir a la reducción de residuos y la conservación de

los recursos naturales. La nanotecnología ha revolucionado nuestra capacidad para transformar la materia a nivel molecular. A través de la manipulación precisa y el control de átomos y moléculas, podemos crear materiales con propiedades únicas y mejoradas. De esta forma, la nanotecnología promete un futuro emocionante y lleno de posibilidades en campos tan diversos como la construcción, la electrónica y la medicina. (Cuyán Barboza *et al.*, 2021; Salazar Estrada y Zavala Yarleque, 2023; Pérez, 2024; Maril-Millán, 2024).

La incorporación de la nanotecnología en la arquitectura también posibilita el desarrollo de edificios inteligentes y conectados "on line" que pueden monitorear y controlar su entorno de manera automática. Estos edificios pueden ajustar la temperatura, iluminación y otros parámetros para optimizar la comodidad y disminuir el consumo de energía. Además, la nanotecnología se está utilizando en la creación de sistemas de energía renovable integrados en los edificios, como celdas solares que se pueden aplicar en las superficies de los edificios. Esto permite una mayor generación de energía limpia y reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables. (Mohammad Y Shubair, 2019; Filipe y Ferreira, 2021; Wang, 2018; Venugopal *et al.*, 2023; Carrola *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2012).

El uso de la nanoelectrónica ha revolucionado la manera en cómo interactuamos con nuestro entorno construido. Los sistemas de vanguardia en nanoelectrónica nos permiten controlar de forma más eficiente y conveniente diferentes aspectos del hogar, como la iluminación, la temperatura y la seguridad. Asimismo, la nanoelectrónica ha dado lugar al desarrollo de sensores avanzados capaces de detectar el movimiento, la humedad y la calidad del aire, proporcionando información esencial para mejorar la calidad de vida en nuestras casas. Gracias a la nanoelectrónica, estamos creando edificios inteligentes que se adaptan a nuestras necesidades y nos brindan mayor comodidad y seguridad. Los edificios ahora pueden adaptarse y responder de manera inteligente a su entorno, gracias a la incorporación de sensores y sistemas de control a nivel nanométrico. Con cada avance en esta tecnología, nuestro entorno construido se vuelve más eficiente, sostenible y respetuoso con el medioambiente. En el futuro, la nanoelectrónica seguirá desempeñando un papel fundamental en la evolución de las edificaciones, permitiendo un mayor control y optimización de los recursos, y mejorando nuestra calidad

de vida en general. Es posible que un edificio como el "One Thousand Museum" de Saha Hadid Architects, en Miami, Estados Unidos (Figura 2), aún no utilice nanomateriales propiamente dichos en su estructura, pero sí incorpora importantes avances en nanoelectrónica que le permiten contar con un sistema de control inteligente en diversas áreas, como el clima y la iluminación, entre otros. (Mena Galarza, 2021; Ospina y Quintero, 2020; Coral Pérez, 2023).

FIGURA 2. EDIFICIO COMO EL "ONE THOUSAND MUSEUM" DE SAHA HADID ARCHITECTS, EN MIAMI, ESTADOS UNIDOS



Fuente propia, 2024.

El propósito de esta revisión bibliográfica es analizar de manera exhaustiva el posible estado actual de la nanotecnología en el ámbito de la arquitectura y explorar las posibles innovaciones y desafíos que pueda enfrentar. Se persigue identificar las aplicaciones más relevantes de la nanotecnología en este campo, así como comprender sus implicaciones éticas, legales y medioambientales. En última instancia, se pretende ofrecer una guía clara y precisa para arquitectos e investigadores interesados en aprovechar el potencial de la nanotecnología en el ámbito de la arquitectura.

CONCEPTOS BÁSICOS DE NANOTECNOLOGÍA

El prefijo nano, proviene del latín *nanus* que quiere decir enano, se utiliza para definir una mil millonésima parte en la escala de medición del tamaño (nanómetros), y del tiempo (nanosegundos). La nanotecnología se define como la manipulación y control de materiales a escala nanométrica, es decir, a nivel de átomos y moléculas. Esta disciplina se centra en la creación y estudio de nanomateriales. Éstos son materiales en los que al menos una de sus dimensiones, está entre 1 a 100 nanómetros. Debido a su tamaño reducido, los nanomateriales presentan propiedades y características físicas, químicas y biológicas únicas. Algunas de éstas incluyen una mayor resistencia, conductividad eléctrica mejorada y reactividad química diferenciada (Mendoza, 2020).

Los nanomateriales también pueden ser utilizados en diversas aplicaciones en la arquitectura, como en la construcción de materiales más fuertes y livianos, sistemas de energía renovable integrados en edificios y recubrimientos autolimpiables. Es importante comprender los conceptos básicos de la nanotecnología para poder aprovechar sus ventajas y contribuir al avance de la arquitectura mediante su aplicación (Farinango-Aules y Tenelema-Toapanta, 2024; Mendoza, 2020; Sazo *et al.*, 2022; Calcina Mamani y Moreno Cusi, 2020; Bustos-Ramírez, 2018).

Las estructuras arquitectónicas están experimentando una transformación radical gracias a los avances en la nanotecnología. La disciplina científica encargada de investigar las propiedades y usos de los materiales a nivel nanométrico ha generado una verdadera revolución en el diseño y la construcción de edificios. La nanotecnología permite ahora fabricar componentes microscópicos de tamaño extraordinariamente reducido, lo cual ha abierto un sinfín de posibilidades creativas en el mundo de la arquitectura. Gracias a esta tecnología, los arquitectos pueden crear estructuras mucho más eficientes, potentes y compactas. Ya no es necesario depender de circuitos voluminosos y aparatosos para lograr un rendimiento destacado en los edificios, ya que ahora todo eso puede obtenerse en un diminuto y delicado chip. Esta nueva era de la arquitectura nanotecnológica nos ha permitido explorar diseños innovadores y audaces. Además, la nanotecnología ha abierto la puerta a la creación de materiales avanzados con propiedades extraordinarias. Ahora es posible

desarrollar materiales ultraligeros, pero increíblemente resistentes, capaces de soportar cargas extremas sin comprometer la estabilidad estructural. Estos materiales nanotecnológicos también pueden ser autolimpiantes y autoreparadores, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento a largo plazo de los edificios (Bermúdez-Medina y Villamil-Rojas, 2021; Copca y González, 2022; Díaz López, 2024).

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS NANOMATERIALES

Los nanomateriales cuentan con características y propiedades únicas debido a su pequeño tamaño y estructura a nivel nanométrico. Estas propiedades incluyen alta resistencia mecánica, mejor conductividad térmica y eléctrica, mayor reactividad química y capacidad para almacenar energía. Además, los nanomateriales pueden mostrar propiedades ópticas especiales, como fluorescencia y plasmones de superficie, lo que los convierte en materiales prometedores para su aplicación en la arquitectura y en la nanoelectrónica. También pueden auto-repararse y auto-limpiarse, lo que aumenta su durabilidad y reduce la necesidad de mantenimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con el uso de nanomateriales en la arquitectura, así como las consideraciones éticas y legales en su aplicación (Gomez-Muñoz *et al.*, 2023; Rojas Taboada, 2023; Chimal *et al.*, 2023; López, 2023; Sánchez Rodríguez, 2023).

Una lista detallada y exhaustiva de las diversas propiedades y características de los nanomateriales que podrían estar potencialmente involucrados en el campo de la construcción arroja resultados realmente fascinantes e impresionantes. Estas propiedades, que se derivan de la escala nanométrica en la que operan, exhiben una amplia gama de aplicaciones y beneficios que se pueden aprovechar para mejorar y revolucionar la industria de la construcción. Algunas de las propiedades notables incluyen su increíble resistencia estructural, su capacidad para autorrepararse, su alta conductividad térmica y eléctrica, su gran resistencia a la corrosión y su excepcional estabilidad química. Además, los nanomateriales exhiben propiedades ópticas avanzadas, como la capacidad de cambiar de color o transmitir la luz de manera altamente eficiente. Todo esto, combinado con su tamaño nanométrico,

les confiere una versatilidad impresionante y abre un mundo completamente nuevo de posibilidades en términos de diseño y construcción de estructuras más seguras, eficientes, duraderas y sostenibles. Con el potencial de mejorar la eficiencia energética, reducir la huella ambiental y fomentar la innovación tecnológica, queda claro que los nanomateriales son una prometedora frontera en el campo de la construcción. Así, su implementación y desarrollo continuo ofrecen revolucionar la forma en como construimos nuestro entorno y nos enfrentamos a los desafíos del futuro (Copca y González, 2022; Britto *et al.*, 2022). A continuación, se presenta una lista más detallada de algunas de esas propiedades:

- **Alta resistencia mecánica:** Los nanomateriales exhiben propiedades mecánicas excepcionales, incluyendo una mayor fuerza y durabilidad debido a su estructura y tamaño a escala nanométrica.
- **Mejorada conductividad térmica y eléctrica:** El pequeño tamaño y estructura única de los nanomateriales contribuyen a una mejor conductividad, facilitando una transferencia eficiente de calor y electricidad (Soleymani *et al.*, 2024).
- **Incrementada reactividad química:** Debido a su alta relación de área superficial a volumen, los nanomateriales muestran una mayor reactividad química, lo que puede ser aprovechado para varias aplicaciones, incluyendo el almacenamiento de energía.
- **Capacidad para almacenar energía:** Los nanomateriales tienen el potencial de mejorar significativamente los sistemas de almacenamiento de energía, aprovechando sus propiedades únicas para aumentar la capacidad y eficiencia.
- **Propiedades ópticas especiales:** Los nanomateriales pueden exhibir características ópticas únicas como la fluorescencia y la resonancia de plasmón de superficie, haciéndolos adecuados para aplicaciones tanto en arquitectura como en nanoelectrónica.
- **Capacidades autoreparadoras y autolimpiantes:** Algunos nanomateriales poseen la habilidad de repararse y mantenerse limpios por sí mismos, reduciendo la necesidad de mantenimiento y extendiendo su vida útil.

- **Resistencia a la corrosión y estabilidad química:** Estos materiales son altamente resistentes a la corrosión y exhiben una excepcional estabilidad química, contribuyendo a la longevidad y durabilidad de las estructuras.
- **Propiedades ópticas avanzadas:** Los nanomateriales pueden alterar su color o transmitir la luz con alta eficiencia, ofreciendo nuevas posibilidades para el diseño y funcionalidad arquitectónica.

Algunos ejemplos de nanomateriales aplicados a la arquitectura

Algunas propiedades de los materiales para la construcción han sido mejoradas gracias a la adición de nanomateriales, por ejemplo, las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) son ampliamente utilizadas como revestimientos reflectantes debido a su color, y debido a sus propiedades antibacterianas, se emplean para esterilizar, desodorizar y prevenir la contaminación de pinturas, ventanas, azulejos y otros elementos decorativos. Las nanopartículas de TiO_2 , se utilizan en revestimientos antivaho para ventanas, así como para mejorar el color del hormigón y hacer que éste mantenga su blancura (Babuka, 2016).

Para reducir el efecto que el ambiente pueda tener en las estructuras del cemento y el hormigón, se les han añadido nanoarcillas, nanopartículas de hierro (Fe_2O_3), y nanopartículas de óxidos metálicos como cobre (CuO), zinc (ZnO) y titanio (TiO_2), lo que ocasiona una mejora significativa en sus propiedades de resistencia, durabilidad y alta eficiencia.

Por otro lado, el uso de nanomateriales multifuncionales ha permitido explorar la aplicación de los nanotubos de carbono (CNT), los cuales mejoran la resistencia a la compresión de mortero de cemento y su elasticidad. Además, el futuro de las aplicaciones de la nanotecnología en la arquitectura, apuntan a utilizar una mejora en las características eléctricas para detectar daños en las estructuras, y poder cerrar grietas en las estructuras del hormigón (Kashef y Sabouni, 2010).

El uso de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) como revestimientos de la madera, evita la aparición de hongos en la madera, haciéndola resistente al fuego y la absorción de los rayos UV y el agua, lo que permitiría conservar por mayor tiempo el diseño arquitectónico de las construcciones (De Filpo *et al.*, 2013).

ESTADO ACTUAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA ARQUITECTURA

Como se indicó en párrafos anteriores, la nanotecnología ha abierto un amplio abanico de posibilidades en el campo de la arquitectura. Uno de los principales avances se encuentra en el desarrollo de recubrimientos inteligentes, capaces de adaptarse perfectamente a las cambiantes condiciones ambientales y proporcionar un aislamiento térmico y acústico óptimo. Estos recubrimientos no solo mantienen una temperatura agradable en el interior de los edificios durante todo el año, sino que también reducen de forma significativa los niveles de ruido provenientes del exterior. Además, gracias a los nanomateriales utilizados, se han logrado avances impresionantes en la fabricación de paneles solares que se integran de forma elegante en las fachadas de los edificios. Esto no solo brinda una solución estética, sino que permite generar energía renovable directamente en los propios edificios, haciendo que sean más sostenibles y autosuficientes en términos energéticos.

Otro avance destacado en el campo de la arquitectura nanoestructurada es la utilización de nanotubos de carbono para mejorar la resistencia y durabilidad de las estructuras. Estos nanotubos proporcionan una mayor capacidad de carga y resistencia a la flexión, lo que resulta en edificios más sólidos y seguros. Ya sea en puentes, rascacielos u otras estructuras, los nanotubos de carbono son capaces de fortalecer cualquier construcción, haciendo que sean más resistentes a factores externos adversos como terremotos o vientos fuertes. Estas innovadoras aplicaciones de la nanotecnología en la arquitectura no solo están impactando en la actualidad, sino que prometen revolucionar por completo la forma en la que se diseña y construye en el futuro. Con cada avance en este campo, se abren nuevas posibilidades y se desafían los límites tradicionales de la arquitectura. En un futuro no muy lejano, podríamos ver edificios inteligentes capaces de adaptarse en tiempo real a las demandas energéticas y climáticas, optimizando así el uso de los recursos y mejorando la calidad de vida de las personas (Adamatzky *et al.*, 2018; Wang, 2018; Carrola *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2012).

En la actualidad, la nanotecnología ha comenzado a ser aplicada en diversos proyectos arquitectónicos, lo que ha generado un gran interés en la comunidad científica y en la industria de la construcción. Un ejemplo destacado es la utilización de nanomateriales en la

fabricación de recubrimientos y pinturas que proporcionan propiedades auto limpiantes y auto reparables a las superficies de los edificios. Además, se están desarrollando materiales de construcción nanoestructurados, como el concreto de alta resistencia, que ofrecen una mayor durabilidad y resistencia mecánica. También se han realizado avances en el diseño de ventanas inteligentes que regulan la entrada de luz y calor en los edificios, contribuyendo a la eficiencia energética. Aunque la aplicación de la nanotecnología en la arquitectura aún está en una etapa temprana, se espera que en un futuro próximo se aceleren las investigaciones y desarrollos en este campo, permitiendo la creación de edificios más sostenibles, eficientes y confortables (Mohammad y Shubair, 2019; Filipe y Ferreira, 2021; Adamatzky *et al.*, 2018; Venugopal *et al.*, 2023; Carrola *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2012).

Proyectos de Arquitectura que incorporan el uso de nanotecnología

La nanotecnología ha sido aplicada en diversos proyectos arquitectónicos que buscan aprovechar las propiedades y características de los nanomateriales. Uno de estos proyectos es el "Bubblecture H" en Japón, donde se utilizan nanomembranas para crear espacios inflables y flexibles. En Amsterdam, se han utilizado nanomateriales en la construcción de un puente (MX3D), lo que permite obtener un material más resistente y ligero. Fue inaugurado a mediados del año 2021. Otro ejemplo es el "Museo MAXXI" en Roma, Italia, donde se emplearon nanopartículas de titanio en la fachada para obtener propiedades autorreparables y autolimpiantes. Estos proyectos demuestran el potencial de la nanotecnología en la arquitectura y su capacidad para generar innovación y mejoras en la construcción de edificios (Adamatzky *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2012; Mohammad y Shubair, 2019; Wang, 2018; Venugopal *et al.*, 2023; Carrola *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2012).

La aplicación de la nanotecnología en la construcción de edificios es a menudo una colaboración entre científicos de materiales, ingenieros y arquitectos, y no siempre se publicita ampliamente debido a la naturaleza técnica de estos avances. Sin embargo, se presentan algunos ejemplos de edificios y proyectos donde se han utilizado tecnologías y materiales avanzados que involucran nanotecnología, junto con los nombres de

los arquitectos o las firmas de arquitectura asociadas cuando están disponibles.

Proyecto Bubbleecture H

El Bubbleecture H del arquitecto Shuhei Endo, emplazado en el extremo norte de un bosque en Sayocho, Hyogo, Japón, representa un innovador Centro Institucional del Medio Ambiente y fue construido entre el 2006 y el 2008. Con una extensión de aproximadamente 1.000 metros cuadrados, este espacio no solo se destina a exposiciones abiertas al público general, sino que también busca fomentar un aumento en el interés por temas ambientales entre todos sus visitantes, incluidos los habitantes de Hyogo. Este proyecto emerge como un nuevo entorno que armoniza espacios comunes con la naturaleza circundante, destacando por sus singulares formas de burbuja, creadas mediante estructuras de cúpula geodésica en madera de ciprés japonés. Estas estructuras están revestidas exteriormente con placas metálicas de 1,2 mm que presentan una expresión de óxido, dotando al conjunto de una estética única y conectada con su entorno.

Incorporando los principios de sostenibilidad y eficiencia energética, el Bubbleecture H utiliza materiales innovadores y técnicas de construcción que minimizan el impacto ambiental. Sus 16 cimientos, de 1,5 metros de diámetro cada uno, evidencian un compromiso con la preservación del entorno natural, utilizando piezas estandarizadas de madera, un material renovable, lo que redujo la huella ambiental durante la construcción. Además, la inclusión de vegetación tipo musgo en techos y muros, que prospera por efecto de la condensación y las condiciones hídricas del suelo, potencia su integración con la naturaleza y contribuye a la eficiencia energética del edificio.

El diseño interior del Bubbleecture H se caracteriza por su simplicidad y la predominancia de la madera natural como material de revestimiento, creando un ambiente cálido y acogedor. La disposición de espacios se planificó en torno a la estructura del edificio, dividida en tres secciones principales que aprovechan el desnivel del terreno para ofrecer vistas y accesos únicos. Las entradas de luz y las vistas exteriores se distribuyen de manera orgánica, siguiendo el orden estructural y reforzando la conexión visual y física con el entorno boscoso.

Este proyecto no solo refleja un enfoque biofílico en su diseño, promoviendo una estrecha relación entre

sus ocupantes y el medio ambiente, sino que también explora la utilización de formas orgánicas y tecnologías avanzadas para mejorar la funcionalidad y la sostenibilidad del espacio. El Bubbleecture H se presenta como un paradigma de arquitectura innovadora, donde la utilización consciente de materiales, el respeto por el entorno natural y el fomento de la interacción con el medio ambiente se entrelazan para crear un lugar verdaderamente inspirador.

Otros ejemplos

- **Torre Agbar en Barcelona, España:** Diseñada por Jean Nouvel, esta torre se completó en 2005. Es conocida por su fachada innovadora que incluye vidrio con capas nanotecnológicas para mejorar la eficiencia térmica y el control solar. Esto significa que el vidrio puede bloquear efectivamente una cantidad significativa de la radiación solar ultravioleta e infrarroja que entra al edificio, reduciendo la carga térmica interna durante los meses más cálidos. Como resultado, se reduce la necesidad de aire acondicionado, lo que disminuye el consumo de energía. El tratamiento nanotecnológico en los vidrios también puede contribuir a la durabilidad de estos, protegiéndolos contra la degradación por exposición a la luz solar y contaminación ambiental. Además, algunas formulaciones nanotecnológicas ofrecen propiedades autolimpiantes que reducen la necesidad de mantenimiento frecuente.
- **The Eden Project en Cornwall, Reino Unido:** Diseñado por Nicholas Grimshaw, el proyecto se inauguró en el año 2001. Aunque más conocido por sus biomas gigantes, ha explorado el uso de nanotecnología en materiales y mantenimiento. La característica más distintiva del Proyecto Eden son sus dos enormes biomas que albergan plantas colectadas de todo el mundo. El bioma más grande simula un ambiente de selva tropical, mientras que el otro está diseñado para replicar un ambiente mediterráneo. Estos biomas están construidos con estructuras de tubos de acero hexagonales y paneles de ETFE (etileno-tetrafluoroetileno), un material plástico ligero y transparente que es extremadamente eficiente en términos de energía y más durable que el vidrio.

- **ArtScience Museum en Singapur:** Moshe Safdie diseñó este museo y se inauguró en 2011. Tiene una forma distintiva inspirada en una flor y utiliza materiales avanzados en su construcción, los cuales podrían estar vinculados a la nanotecnología.
- **The Al Bahr Towers en Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos:** Desarrollado por Aedas Architects, este proyecto se completó en 2012. Las Al Bahr Towers destacan por su sistema de fachada inteligente que se adapta automáticamente a la posición del sol para controlar la ganancia de calor y maximizar la eficiencia energética. Este sistema de “mashrabiya” no se basa en nanotecnología, sino más bien en ingeniería mecánica y diseño arquitectónico avanzado para lograr sus objetivos de sostenibilidad.
- **Burj Khalifa en Dubai, Emiratos Árabes Unidos:** Diseñado por Adrian Smith mientras estaba en Skidmore, Owings & Merrill (SOM), el Burj Khalifa se completó en 2010. Incorpora avances en ingeniería y materiales de construcción para lograr su altura récord y rendimiento térmico, los cuales podrían estar ligados a desarrollos nanotecnológicos.
- **Centro de Ciencias Phaeno de Zaha Hadid en Wolfsburg, Alemania:** Diseñado por Zaha Hadid en los años 50s, este proyecto de 79 millones de euros, alberga a un museo científico. Es la estructura de hormigón autocompactable más grande de toda Europa; y en el 2004, se galardonó a Hadid con el premio de arquitectura Pritzker, por la creación del museo Phaeno, cuya arquitecta se acerca a los sorprendentes bocetos que la hicieron famosa. Aunque el Phaeno no es conocido específicamente por utilizar nanotecnología, su construcción involucra prácticas sostenibles en términos de materiales y uso de la energía. El diseño del edificio facilita la ventilación natural y la iluminación eficiente, contribuyendo a reducir su huella energética.
- **Edificio Florence Mila Borchert Big Cat Country en el Zoológico de Milwaukee, USA,** este edificio construido de piedra y hormigón, tenía daños estructurales asociados a la edad, además, se requería de más luz natural para mejorar la vida de los grandes felinos que en él habitaban; por lo que se

le instalaron en el techo paneles de vidrio rellenos de aerogel con nanopartículas de sílice, esto además mejoró el rendimiento térmico bajando la demanda energética y beneficiando a su vez la calidad de vida de los leones.

Es importante señalar que mientras estos edificios representan la vanguardia del diseño arquitectónico y la innovación en materiales, la información específica sobre nanotecnología puede no estar ampliamente divulgada o puede ser parte de un conjunto más amplio de tecnologías utilizadas en el proyecto. La colaboración interdisciplinaria entre arquitectos, ingenieros y científicos es clave para integrar estas nuevas tecnologías en la arquitectura contemporánea.

Caso Costa Rica

Costa Rica ha mostrado un interés creciente en la investigación y aplicación de nuevas tecnologías, incluida la nanotecnología, en varios sectores. Costa Rica se destaca en América Latina por su compromiso con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, lo que la coloca en una posición favorable para explorar la nanotecnología en campos como la medicina, la ingeniería y posiblemente la arquitectura.

En Costa Rica, el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) es un centro destacado donde se llevan a cabo investigaciones avanzadas en nanomateriales, entre otros campos. Concretamente el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), está involucrado en el desarrollo de tecnologías que podrían tener aplicaciones significativas en la arquitectura del futuro. A través del estudio y manipulación de materiales a escala nanométrica, los investigadores en el CeNAT exploran nuevas posibilidades para crear materiales de construcción más ligeros, más resistentes y eficientes energéticamente. Estas investigaciones no solo prometen mejorar la durabilidad y la funcionalidad de los edificios, sino también su impacto ambiental y eficiencia, alineándose con la visión de sostenibilidad que caracteriza a Costa Rica.

INNOVACIONES FUTURAS EN LA ARQUITECTURA GRACIAS A LA NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología promete ofrecer varias innovaciones futuras en la arquitectura. Una de ellas son los materiales inteligentes y autoreparables, los cuales tendrán la

capacidad de detectar daños y repararse a sí mismos de manera automática. Esto brindará una mayor durabilidad y vida útil a las estructuras arquitectónicas.

Otra innovación será la incorporación de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética en los edificios. Gracias a la nanotecnología, será posible desarrollar materiales y dispositivos que generen energía a partir de fuentes renovables, como la solar y la eólica, y optimizar su uso para reducir el consumo energético en las construcciones. Además, se espera que la nanotecnología permita diseñar y construir estructuras más resistentes y ligeras. Los nanomateriales podrán mejorar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción, lo que permitirá la creación de estructuras más seguras y eficientes. Estas innovaciones contribuirán a la creación de una arquitectura más sustentable, eficiente y durable en el futuro. (Nieto Jiménez, 2020)

Además, los nanosensores y nanodispositivos pueden ser implementados en los sistemas de iluminación y climatización de los edificios, permitiendo un control más preciso y eficiente del consumo energético. A su vez, la nanotecnología está siendo utilizada para desarrollar materiales aislantes más eficientes, como pinturas y revestimientos nanoporosos que reducen la transferencia de calor. Estas innovaciones están contribuyendo a la creación de edificios más sostenibles y energéticamente eficientes.

Limitaciones y retos

Como se indicó, la nanotecnología en la arquitectura presenta un gran potencial para revolucionar la construcción y el diseño de edificios mediante el desarrollo de materiales con propiedades superiores, como mayor resistencia, mejor eficiencia energética y capacidades autoreparables. Sin embargo, existen limitaciones significativas que necesitan ser abordadas para maximizar sus beneficios y asegurar su aplicación segura y efectiva.

Una de las principales limitaciones es la necesidad de una comprensión más profunda de cómo las manipulaciones a nanoescala afectan las propiedades de los materiales a largo plazo y bajo diferentes condiciones ambientales. Los estudios futuros deberían centrarse en explorar la estabilidad y el comportamiento de los nanomateriales en diversos entornos, especialmente aquellos que enfrentan condiciones extremas. Además,

los efectos potenciales de los nanomateriales en la salud humana y el medio ambiente aún no están completamente entendidos, lo que genera preocupaciones sobre su sostenibilidad y seguridad. Es crucial desarrollar metodologías de evaluación del ciclo de vida que incluyan aspectos de toxicidad y impacto ecológico, y trabajar en el desarrollo de nanomateriales que sean tanto biocompatibles como amigables con el medio ambiente.

Otro desafío es el costo y la accesibilidad de la nanotecnología en la construcción, que actualmente limitan su uso generalizado. Es necesario investigar métodos de síntesis más eficientes y económicos y buscar materiales alternativos que reduzcan los costos, permitiendo una adopción más amplia, especialmente en países en desarrollo. Además, la falta de regulaciones y estándares específicos para el uso de nanotecnología en la construcción puede obstaculizar su adopción. Es vital una colaboración entre investigadores, legisladores y la industria para establecer normativas que aseguren la calidad y seguridad de los nanomateriales utilizados en la construcción.

La integración de la nanotecnología con las prácticas de construcción existentes también presenta desafíos técnicos. Los futuros estudios deberían enfocarse en desarrollar soluciones que puedan ser implementadas con las tecnologías actuales y estudiar su interacción con materiales tradicionales. Este enfoque no solo abordará las limitaciones actuales, sino que también avanzará significativamente el campo de la nanotecnología en la arquitectura, permitiendo innovaciones que son tanto sostenibles como seguras para el futuro del diseño y construcción.

Para lograr estos avances, será crucial fomentar la innovación en el diseño de nanomateriales, desarrollar programas educativos para arquitectos e ingenieros, y promover colaboraciones interdisciplinarias que creen enfoques holísticos en el desarrollo de materiales y técnicas constructivas. Estas medidas ayudarán a superar las barreras actuales y a maximizar el potencial transformador de la nanotecnología en el campo de la arquitectura.

CONSIDERACIONES ÉTICAS Y LEGALES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA ARQUITECTURA

La aplicación de la nanotecnología en la arquitectura plantea consideraciones éticas y legales importantes. En cuanto a los posibles riesgos para la

salud humana y el medio ambiente, se deben llevar a cabo investigaciones exhaustivas para evaluar los efectos de los nanomateriales en la salud a corto y largo plazo, así como en el ecosistema. Además, es necesario establecer regulaciones y normativas que regulen el uso de la nanotecnología en la arquitectura, asegurando que se cumplan los estándares de seguridad y protección. Los arquitectos también tienen la responsabilidad social de utilizar los nanomateriales de manera responsable y garantizar que su aplicación beneficie a la sociedad en general, protegiendo los derechos de las personas y evitando impactos negativos en el entorno construido y natural (Salinas *et al.*, 2023; Malavé Panchana y Jativa Toapanta, 2023; Feijoo, 2022; Aznar-Mollá, 2023; Villamor Sancho, 2020).

Posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente

El incremento de productos comerciales de base nanotecnológica ha motivado un cuestionamiento importante sobre sus implicaciones en la salud y el medio ambiente, a medida que su comercialización se expande a otras áreas de la vida, es crucial garantizar su bioseguridad. La nanotecnología en la arquitectura presenta posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente que deben ser considerados. En primer lugar, existe la preocupación de que los nanomateriales utilizados en la construcción, como el dióxido de titanio y los nanotubos de carbono, puedan ser tóxicos para los seres humanos si se inhalan o se absorben a través de la piel. Además, la liberación de estos nanomateriales al medio ambiente durante la construcción y demolición de edificios podría tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Por otro lado, la nanotecnología también plantea interrogantes sobre su gestión de residuos, ya que los productos nanoestructurados podrían generar sustancias tóxicas al final de su vida útil. Es necesario llevar a cabo investigaciones exhaustivas para evaluar y mitigar estos posibles riesgos antes de que la nanotecnología se utilice de manera generalizada en la arquitectura. (Cruz-Gómez *et al.*, 2021; Soto-Vazquez *et al.*, 2022; Vega y Camacho, 2023; Berger, 2023; Feijoo, 2022; Abrica-González y Gómez-Arroyo, 2022; Aznar-Mollá, 2023; Farinango Aules y Tenelema Toapanta, 2024).

Regulaciones y normativas relacionadas con la nanotecnología

El desarrollo y uso de nanotecnología ha generado la necesidad de establecer regulaciones y normativas específicas para garantizar su seguridad y control. En muchos países, se han implementado leyes y regulaciones sobre el uso y manejo de nanomateriales en la construcción, con el objetivo de proteger la salud humana y minimizar los posibles impactos ambientales. Estas regulaciones abarcan desde la producción y comercialización de nanomateriales, hasta su uso en la construcción de edificios. Asimismo, se establecen normas relacionadas con la gestión de residuos de nanomateriales y la protección de los trabajadores expuestos a estos materiales.

La normativa también puede incluir requisitos de etiquetado y registro de productos que contengan nanomateriales. Es importante que los arquitectos y profesionales del sector estén familiarizados con estas regulaciones y cumplan con los requisitos legales para garantizar la seguridad y el cumplimiento de las normas en el uso de nanotecnología en la arquitectura (Vega y Camacho, 2023; Díaz López, 2024; Zape Ordoñez, 2020; Saldívar, 2020).

En el caso específico de la nanotecnología y el desarrollo de nanomateriales que podrían ser empleados en la construcción, se tiene el Comité Técnico ISO TC229 de la Organización Internacional de Normalización, el cual juega un papel esencial en el campo de la nanotecnología, estableciendo normas y directrices internacionales que abarcan las nanociencias y sus aplicaciones tecnológicas. Este comité fue formado para responder a la necesidad emergente de regulación y estandarización en este campo en expansión, con el propósito de apoyar la innovación, garantizar la seguridad, y fomentar la adopción global de prácticas responsables y sostenibles en nanotecnología.

El ISO TC229 es responsable del desarrollo de normas internacionales que cubren una amplia gama de aspectos críticos relacionados con la nanotecnología. Estas áreas incluyen la terminología, las metodologías para la medición y caracterización de nanoestructuras, la evaluación de riesgos ambientales, de salud y seguridad, y la sostenibilidad de las tecnologías y productos basados en nanotecnología. Estas normas son fundamentales para asegurar que los productos y tecnologías no solo sean innovadores y eficientes, sino

también seguros tanto para los consumidores como para el medio ambiente.

Además, el ISO TC229 promueve la colaboración internacional, facilitando el diálogo y la cooperación entre diferentes países, industrias y académicos. Esta colaboración es crucial para abordar los desafíos que cruzan fronteras en la nanotecnología, tales como la regulación de mercados, la protección de la propiedad intelectual y las cuestiones éticas en la investigación y desarrollo. El comité ayuda a desarrollar un entendimiento común y fomenta la adopción de prácticas estandarizadas, lo que es vital para una implementación segura y efectiva de la nanotecnología a escala global.

El trabajo del ISO TC229 también tiene un impacto directo en la promoción de la innovación y la adopción tecnológica. Al proporcionar un marco de referencia estandarizado, el comité no solo ayuda a mitigar los riesgos asociados con la nanotecnología, sino que también facilita la comercialización de nuevas tecnologías. Las empresas se apoyan en estas normas para guiar el desarrollo de productos, lo que reduce el tiempo y los costos asociados con el desarrollo tecnológico y su introducción en el mercado.

La relevancia del ISO TC229 continúa creciendo a medida que la nanotecnología se integra en diversas industrias, incluidas la electrónica, los biomateriales, la energía y la construcción. Las normas establecidas por este comité aseguran que las innovaciones en nanotecnología se implementen de manera segura y efectiva, cumpliendo con los estándares internacionales de seguridad y eficacia. Además, en un entorno global donde las regulaciones a menudo no están al día con los avances tecnológicos, el ISO TC229 es crucial para establecer la base sobre la que se construirán las políticas y regulaciones futuras en relación con la nanotecnología. Hay 40 países miembro del ISO TC229, entre los que se encuentran Costa Rica, Estados Unidos, Colombia, México, Brasil, Australia, los miembros de la Unión Europea, entre otros.

Hay unas 110 normas establecidas, una de ellas es la ISO 19007:2018, titulada “Nanotechnologies – In vitro MTS assay for measuring the cytotoxic effect of nanoparticles” se traduce al español como “Nanotecnologías– Ensayo in vitro MTS para medir el efecto citotóxico de las nanopartículas”. Esta norma internacional proporciona directrices para llevar a cabo el ensayo MTS, un método utilizado para evaluar la

toxicidad celular de las nanopartículas. El ensayo MTS (abreviatura de [3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-5-(3-carboximetoxifenil)-2-(4-sulfonyl)-2H-tetrazolio]) implica la adición de un compuesto tetrazolio a las células en cultivo (ISO.org, 2024).

CONCLUSIONES

La incorporación de la nanotecnología en el campo de la arquitectura y la construcción representa un horizonte prometedor, capaz de inaugurar una nueva era de innovaciones y avances significativos. La aplicación de nanomateriales en el diseño arquitectónico no solo ofrece la posibilidad de crear edificaciones más eficientes y sostenibles desde el punto de vista energético, sino que también establece nuevos paradigmas en la resistencia estructural, la reducción de peso y la optimización del espacio.

Los avances en nanotecnología han facilitado el desarrollo de materiales con capacidades antes inimaginables. Entre estas, destacan la autoreparación, que promete extender la vida útil de las estructuras de manera considerable, y la adaptabilidad ambiental, que permite a los edificios responder de forma dinámica a las condiciones climáticas variables, mejorando así el confort de los ocupantes y la eficiencia energética global. Además, los recubrimientos y pinturas nanotecnológicos ofrecen propiedades autolimpiantes y antimicrobianas, lo que reduce la necesidad de mantenimiento y mejora la calidad del aire interior.

Sin embargo, el entusiasmo por las posibilidades que ofrece la nanotecnología no debe eclipsar la necesidad de una consideración cuidadosa de sus impactos potenciales en la salud humana y el medio ambiente. La producción, uso y disposición de nanomateriales pueden conllevar riesgos aún no completamente entendidos, lo que requiere una investigación continua y un enfoque precautorio en su aplicación. La regulación y estandarización en el ámbito internacional se tornan esenciales para garantizar que la innovación tecnológica no preceda a la seguridad y la protección ambiental.

En este contexto, los arquitectos y constructores enfrentan el desafío ético de equilibrar la innovación con la responsabilidad. El diseño consciente y el uso ético de la nanotecnología deben ser pilares fundamentales en la formación y práctica profesional, asegurando que las maravillas arquitectónicas del mañana no

comprometan la salud humana ni el bienestar del planeta. La transparencia, la participación pública en el proceso de diseño y la colaboración multidisciplinaria son clave para fomentar una comprensión más profunda de los beneficios y limitaciones de la nanotecnología en la arquitectura.

Por último, el potencial transformador de la nanotecnología en la industria de la construcción es

indudable, pero su futuro sostenible depende de una implementación consciente y regulada. La adopción de un marco ético y legal sólido, junto con un compromiso inquebrantable con la investigación y la innovación responsable, son cruciales para aprovechar al máximo las promesas de la nanotecnología, asegurando al mismo tiempo la protección y el mejoramiento de nuestra sociedad y entorno natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrica-González, P. y Gómez-Arroyo, S. (2022). Efectos y caracterización de nanopartículas atmosféricas (NP-CuO, ZnO) en plantas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992022000100201
- Adamatzky, A., Szacilowski, K., Przyczyna, D., Konkoli, Z., Ch. Sirakoulis, G. y C. Werner, L. (2018). *On buildings that compute. A proposal*. <https://arxiv.org/pdf/1811.07440>
- Aznar-Mollá, F. (2023). *Tesis Evaluación del riesgo toxicológico para la salud y el medio ambiente en la fabricación y uso de nanomateriales*. <https://www.tesisenred.net/handle/10803/688907#page=1>
- Babuka, Hristijan. (2016). Conference: Fourth Student Conference *Application of Nanotechnologies in Sustainable Architecture* “Energy Efficiency and Sustainable Development” - SCEESD 2016. https://www.researchgate.net/publication/322896659_Application_of_Nanotechnologies_in_Sustainable_Architecture
- Berger, M. (2023). Agro-nanotecnología en Argentina. De los experimentos a los desafíos regulatorios nano-específicos. *Nanotecnologías, ambiente y sustentabilidad en Argentina*. 419-447. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/550259>
- Bermúdez-Medina, J. A. y Villamil-Rojas, O. A. (2021). *Trabajo de graduación Influencia de la nanotecnología en los materiales de construcción para obras civiles*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/14e7234f-42da-4caa-a7b1-2483a32dc362/content>
- Britto Hurtado, R., Cortez-Valadez, M., Y Flores-Acosta, M. (2022). Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria. *Epistemus (Sonora)*, 16(33), 46-54. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-81962022000200046&script=sci_arttext
- Bustos-Ramírez, K. (2018). *El Grafeno: promesa de un magnífico material*. Gobierno del Estado de Veracruz, México. 22-25. https://www.academia.edu/56876055/Compiladores_y_Editores
- Calcina Mamani, R. y Moreno Cusi, Y. (2020). *Trabajo de investigación Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para consumo humano*. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3452/Raquel_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Carrola, M., Asadi, A., Zhang, H., G. Papageorgiou, D., Bilotti, E., y Koerner, H. (2022). *Best of both worlds: Synergistically derived material properties via additive manufacturing of nanocomposites*. <https://arxiv.org/pdf/2202.02378>
- Chimal, R., Hernández, R. T., y Alatorre, J. A. (2023). Aplicación de los nanomateriales en la mejora de autopartes: inicio de una nueva era en el desarrollo de automóviles. *Materiales Avanzados*. https://revista.iim.unam.mx/index.php/materialesa_avanzados/article/download/13/17/23
- Copca, J. H. L. y González, S. A. M. (2022). Materiales alternativos en la arquitectura: hacia una construcción sostenible. *Voces y Saberes*. <http://vocesySaberes.aragon.unam.mx/index.php/RAVS/article/view/33/33>
- Coral Pérez, D. F. (2023). *Tesis Estudio de reducción de efectos ocasionados por humedad utilizando una protección superficial sobre los contactos eléctricos a base de nanopartículas en instalaciones sometidas a condiciones de humedad*. <https://repositorio.utn.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/13490/2/04%20MEL%20180%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Cruz-Gómez, J., Santos-Cruz, J., Mayén-Hernández, S. A. y De Moure-Flores, F. (2021). Problemas y soluciones relacionadas a la toxicidad de nanomateriales. *Digital Ciencia* 14(2), 10-18. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/621/595>

- Cuyán Barboza, A. E., Mio Monja, J. L., y Muñoz Pérez, S. P. (2021). Comportamiento Térmico y Estructural del Concreto Expuesto a Altas Temperaturas: Una Revisión de la Literatura. *INVESTIGATIO*, (16), 78-93. <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/IRR/article/view/560>
- De Filpo, G., Palermo, A. M., Rachiele, F. y Nicoletta, F. P. (2013). Preventing fungal growth in wood by titanium dioxide nanoparticles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.07.007>
- Díaz López, J. L. (2024). *Aplicación de residuos, subproductos industriales y nanomateriales para la estabilización y ejecución de capas estructurales de carreteras*. <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/27530/2024000002834.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Farinango-Aules, D. M. y Tenelema-Toapanta, E. G. (2024). *Proyecto de Graduación Estado del arte de la nanotecnología relacionado al medio ambiente y la sostenibilidad*. <https://repositorio.utc.edu.ec/jspui/bitstream/27000/11725/1/PC-003143.pdf>
- Feijoo, R. (2022). *Tesis Diseño de una metodología para la valoración del riesgo ocupacional en trabajadores que manipulan nanomateriales*. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/e9b47bd1-1be2-47df-9a0d-1b1726e96b5d/content>
- Filipe, A.J. y Ferreira, A.M. (2021). *Analysis of nanosciences and nanotechnology and their applications*. <https://arxiv.org/pdf/2111.03425>
- Gomez-Muñoz, C. L., Zaca-Morán, P., y Zaca-Moran, O. (2023). *Los nanomateriales y su importancia en la síntesis amigable con el ambiente*. RD-ICUAP. <http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/1062/1111>
- Hernández Rosales, A. (2023). López, D. N. C. (2023). *Fabricación de Electrodo Conductores Transparentes (ECTs) Plasmónicos a Base de Nanoalambres de Plata (NAs-Ag)*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/delcf30e-f5fa-4da4-b59a-7066e005defb/content>
- ISO.org. (2024). <https://www.iso.org/committee/381983.html>
- Kashef, M. y Sabouni, A.R. (2010). *Nanotechnology and the Building Industry, Proceedings of the International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications, Ottawa, Ontario, Canada, 4-6 August 2010*. https://www.researchgate.net/publication/322632429_Nanotechnology_and_the_Building_Industry
- Khan, J., M. Nolen, C., Teweldebrhan, D., Wickramaratne, D., K. Lake, R., y A. Balandin, A. (2012). *Anomalous Electron Transport in Field-Effect Transistors with Titanium Ditelluride Semimetal Thin-Film Channels*. <https://arxiv.org/pdf/1201.1526>
- Malavé Panchana, M. B. y Jativa Toapanta, A. N. (2023). *Estudio de materiales sostenibles y sustentables para la construcción de edificaciones ecoamigables en la provincia de Santa Elena*. Ecuador. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10587/1/UPSE-TIC-2023-0040.pdf>
- Maril-Millán, Y. A. (2024). *Tesis Laminado en frío con rodillos rugosos: un nuevo proceso para la obtención de micro o nano granos superficiales en grandes áreas*. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/11783?show=full>
- Mena Galarza, D. R. (2021). *Guía metodológica para el control de vulnerabilidades informáticas en dispositivos IOT (Internet of the Things) para redes HAN (Home Area Network)*. <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/14626/1/20T01394.pdf>
- Mendoza, M. J. P. (2020). *¿Cómo fabrico un material nano?* https://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_056-art1.pdf
- Menéndez López, R. M. (2023). *Materiales del futuro: el impacto de la nanotecnología y la revolución del grafeno*. *Revista Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería*, (3), 35-47. https://digital.csic.es/bitstream/10261/351671/1/Materiales_del_Futuro_R_Menendez_AACI-vol.-3-2023.pdf
- Mohammad, H. y Shubair, R. M. (2019). *Nanoscale Communication: State-of-Art and Recent Advances*. <https://arxiv.org/abs/1905.07722>
- Muñoz Pérez, S., Tuse Vargas, Y., Guerrero Santisteban, K. y Vázquez Pérez, Y. (2021). *Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: Revisión Literaria*. *Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada*, 6(4), 74-87. <http://revistas.poli.br/index.php/rep/article/view/1676/761>
- Nieto Jiménez, E. (2020). *Tesis Nuevos materiales: aplicaciones y sostenibilidad*. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/45458/TFG-I-1783.pdf?sequence=1>
- Ospina, J. M. M. y Quintero, F. A. V. (2020). *Las organizaciones y el impacto de las tecnologías emergentes*. (Capítulo I). La industria. <https://alinin.org/wp-content/uploads/2020/12/La-industria-40-13-32.pdf>
- Pérez, B. D. O. (2024). *Tesis Evaluación de los materiales compósitos SiO₂-TiO₂ para la industria textil*. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10336/1/IGLIN-250877%20%28Pdf%20-A%29.pdf>

- Quintana, R. R. B. y Wilson, A. M. M. (2021). *Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología*. TECNOCENCIA Chihuahua. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/861/1766>
- Rojas Taboada, M. (2023). *Síntesis y bibliometría de óxido de grafeno, su reducción por irradiación gamma y aplicaciones en almacenamiento de energía*. <http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/3329/ROTMBX01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salazar Estrada, V. S. y Zavala Yarleque, L. S. (2023). *Tesis Comparación de la resistencia a la compresión in vitro entre resinas Bulk Fill y resinas convencionales*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/127445/Salazar_EVS-Zavala_YLS-SD.pdf?sequence=1
- Saldívar Tanaka, L. (2020). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional, para la nanotecnología. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 13(24). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912020000100204&script=sci_arttext
- Salinas-Pérez, F del C., Garrido-Hernández, A., Gómez-Alonso, I., del Socorro Ruiz-Palma, M., García-Domínguez, G. y Chávez-Güitrón, L. E. (2023). Pruebas toxicológicas para la evaluación de nanomateriales: Artículo de revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial5), 88-101. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/11825/10918>
- Sánchez Rodríguez, C. (2023). *Desarrollo, caracterización y propiedades de nanofases, nanofluidos y nanomateriales*. <https://repositorio.upct.es/entities/publication/cfde8b11-464b-45dd-a326-a011e5cd1a6d>
- Sazo, A., Escobar, J. J., Morales, B., López, N., y Cifuentes, J. I. (2022). *Ingeniería Biomédica Y Nanobiotecnología*. https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Cifuentes-3/publication/364653411_Ingenieria_Biomedica_Y_Nanobiotecnologia_UMG/links/6355cc1996e83c26eb4aa19e/Ingenieria-Biomedica-Y-Nanobiotecnologia-UMG.pdf
- Soleymani, M., Amrollahi, R., Taghdir, S. y Barzegar, Z. (2024). *Nanotechnology for Thermal Comfort and Energy Efficiency in Educational Buildings: A Simulation and Measurement*. The approach in BSh Climate. (Preprint, Version 1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3927685/v1>
- Soto-Vazquez, R., Záyago Lau, E. y Maldonado López, L. A. (2022). Gobernanza de la nanomedicina: Una revisión sistemática. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 15(28). <https://scielo.org.mx/scielo.php>
- Torres-Solis, C., y Quiroz-Juárez, M. (2023). Convergencia de la inteligencia artificial y la nanotecnología. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e-14e. <https://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/69775>
- Utsev, T., ToryilaTiza, M., Ogunleye, E., Sesugh, T., Jiya, V.H. y Onuzulike, C. (2023). Nanotechnology and the construction industry. *NanoEra*, 3(1):1-7. DOI: 10.5152/NanoEra.2023.1189977
- Vega Baudrit, J. R. y Camacho Elizondo, M. (2023). Pequeñas partículas, grandes riesgos: implementación de regulaciones en nanomateriales en Costa Rica y la importancia de garantizar la seguridad y sostenibilidad de una tecnología emergente. *LOGOS*, 4(2): 133-139. https://dspace.ulead.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/123456789/248/Jos%C3%A9Vega_MelissaCamacho.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Venugopal, A., Seth, V., Subhash Naik, S., Valappil, S., Verma, A., Rajan, S., Vilas Shetgaonkar, P., Sinha, A., y Munjal, S. (2023). *A Mini Review on The Applications of Nanomaterials in Forensic Science*. <https://arxiv.org/pdf/2305.09643>
- Villamor Sancho, E. J. (2020). *Tesis Impacto medioambiental del uso de nanopartículas*. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/103533/VILLAMOR%20SANCHO%20EDUARDO.pdf?sequence=1>
- Wang, G. (2018). *Nanotechnology: The New Features*. <https://arxiv.org/pdf/1812.04939>
- Zape Ordoñez, A. B. (2020). *Trabajo de grado Diseño de un programa de intervención para el control de riesgo químico en la construcción de viviendas realizadas por la empresa W Valle Verde Comercializadora*. <https://repositorio.uniajc.edu.co/server/api/core/bitstreams/b7912e60-167e-4d01-b8d5-cd5e04804735/content>