



Nanocelulosa en sensores avanzados: Implicaciones para la eficiencia, sostenibilidad y desarrollo en las industrias aeronáutica y aeroespacial.

Juan Carlos Arias Cañón

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Ciencias Naturales y Matemática

Directora

Sara Natalia Herrera Penagos, Doctor (PhD) en Ingeniería Química

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Ciencias Naturales y Matemática

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

Con enorme gratitud y agradecimiento, dedico este esfuerzo:

A mi abuela que con ejemplo me mostró que la perseverancia y los valores priman en el ser humano.

A mi madre que con su apoyo incondicional me ha formado en valores y constancia en mi seguir.

A Dios y a la Virgen María que a través del contacto espiritual abrieron caminos pese a las dificultades.

Agradecimientos

A la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), coordinación de la Maestría en Ciencias Naturales y Matemática, a mi tutora Doctora Sara Natalia Herrera Penagos, por sus invaluable aportes, acompañamiento, asesoría y aprendizajes a lo largo de la Maestría y proyecto presentado, pese a las dificultades de salud presentadas.

Tabla de contenido

Resumen	12
Abstract.....	14
Introducción.....	16
1. Planteamiento del problema.....	18
1.1. Contexto General de la Ciencia de los Materiales y la nanotecnología.....	18
1.2. Formulación del problema:	22
2. Justificación.....	24
2.1. Pregunta de Investigación	26
3. Objetivos	28
3.1 Objetivo general.....	28
3.2 Objetivos específicos.....	28
4. Marco teórico	29
4.1 Sensores empleados en la industria aeronáutica	39
4.2 Sensores Estructurales (<i>Structural Health Monitoring - SHM</i>).....	41
4.3 Sensores Piezoeléctricos	41
4.4 Sensores de Temperatura	42
4.5 Sensores de Humedad.....	42
4.6 Sensores de Presión	42
4.7 Biosensores	43
4.8 Integración con Tecnologías Emergentes	43
4.9 Normativas y estándares.....	44

4.10 Síntesis y Gap del Conocimiento.....	52
4.11 Estado del arte.....	54
4.12 Marco Conceptual.....	63
4.12.1 Alta Resistencia.....	69
4.12.2 Ligereza	69
4.12.3 Biodegradabilidad	69
4.12.4 Versatilidad.....	69
4.12.5 Baja Toxicidad	69
4.12.6 Propiedades Modificadoras	70
4.13 Teoría de la Nanotecnología Aplicada a Sensórica	72
4.14 Modelos de Interacción de Materiales.....	72
4.15 Modelos de Sensores Electroquímicos.....	73
4.16 Modelos de Sensores Ópticos	73
4.17 Tecnologías Utilizadas en la Fabricación de Sensores de Nanocelulosa.....	74
4.17.1 Impresión 3D.....	74
4.17.2 Métodos de Recubrimiento y Composición	74
4.18 Técnicas de Nanotecnología y sus aplicaciones	74
4.19 Métodos de Funcionamiento de Sensores de Nanocelulosa	74
4.20 Normativas y Estándares.....	75
4.21 Desafíos y Oportunidades Futuras.....	77
5. Metodología	88
5.1 Claridad de la Pregunta de Investigación:	99
5.2 Adecuación del Diseño del Estudio:	99

5.3	Selección de Participantes o Muestras:	100
5.4	Medición de Resultados:	100
5.5	Control de Factores Confusores:	100
5.6	Generalización de los Resultados:.....	100
7.	Resultados y Análisis.....	102
8.	Discusión	104
8.1	Escalabilidad limitada:	105
8.2	Integración incipiente:	105
8.3	Ausencia de normativas específicas:	105
9.	Conclusiones	108
10.	Recomendaciones	110
11.	Referencias	112
Anexos	120

Lista de tablas

Tabla 1 Comparativo entre sensores convencionales y sensores basados en nanocelulosa.....	43
Tabla 2 Desarrollo de sensores de nanocelulosa basados en teorías nanotecnológicas	454
Tabla 3 Nivel de madurez tecnológica para ejemplos de sensores de nanocelulosa.....	57
Tabla 4 Matriz cuantitativa sobre evolución temporal de la investigación en nanocelulosa ...	90
Tabla 5 Lista de verificación de Prisma 2020.....	93
Tabla 6 Características de los sensores basados en nanocelulosa a través de la metodología Prisma 2020.....	98
Tabla 7 Evaluación de Calidad de Estudios Usando el Método CASP	101

Lista de Figuras

Figura 1 Tratamientos mecánicos para obtener nanocelulosa: a) homogeneización, b) grinder y c) microfluidizador.....	21
Figura 2 Estructura química de la Nanocelulosa	29
Figura 3 Producción por toneladas de celulosa a nivel mundial.....	30
Figura 4 Estructura química y molecular de la Glucopiranosas.....	30
Figuras 5 y 6 Nanocristales y Nanofibrillas.....	34
Figura 7 Estructura presente de celulosa en raquis del banano	35
Figura 8 Imágenes en microscopía electrónica de barrido-emisión de campo (FE-SEM) a) imagen de haces de nanofibrillas de celulosa y b) imagen en microscopia de fuerza atómica (AFM) de nanofibrillas (superficie).....	36
Figura 9 Componentes poliméricos de las paredes celulares de las plantas.....	37
Figura 10 Tipos de Sensores aplicados.....	46
Figura 11 Sistema de monitoreo y Sensórica para una aeronave.....	49
Figura 11 Ilustración de técnicas de sensórica a partir de la nanocelulosa.....	58
Figura 12 Aplicaciones de la nanocelulosa en la actualidad.....	59
Figura 13 Estructura nanofibrilar de la celulosa.....	60
Figura 14 Mapa temático de investigación de la producción Científica Colombiana.....	61
Figura 15 Mapa temático sobre conceptos claves de nanocelulosa.....	61
Figura 16 Cambio de fase síntesis de material nanoparticulado.....	75
Figura 17 Escala Nanométrica.....	76
Figura 18 Serie de Bowen.....	77
Figura 19 Mars Rover Perseverance.....	78
Figura 20 Microfibras de celulosa y su estructura.....	81
Figura 21 Materiales basados en nanocelulosa.....	82
Figura 22 Evolución temporal de la investigación en nanocelulosa.....	87

Figura 23 Flujograma metodología PRISMA para la selección de artículos sobre sensores basados en nanocelulosa aplicados a la industria aeronáutica y aeroespacial.....	89
Figura 24 Programa de Habilidades de Evaluación Crítica.....	95
Figura 25 Diagrama de barras sobre evaluación CASP en artículos científicos seleccionados.....	96

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
CE	Conformité Européenne
CNC	Nanocristales de Celulosa
CNF	Nanofibras de Celulosa
ESA	Agencia Espacial Europea
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
ISO	Organización Internacional de Normalización
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NCB	Nanocelulosa Bacteriana
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OCYT	Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología
PhD	Philosophiae Doctor
PVDF	Fluoruro de Polivinilideno
SHM	Structural Health Monitoring
TRL	Technology Readiness Level, Nivel de Madurez Tecnológica
UPB	Universidad Pontificia Bolivariana
UV	Ultravioleta

Resumen

La innovación en materiales funcionales es un pilar fundamental para el avance de las industrias aeronáutica y aeroespacial, sectores que exigen altos estándares de eficiencia operativa, confiabilidad estructural, seguridad y sostenibilidad ambiental. En este contexto, los sensores avanzados desempeñan un papel estratégico al posibilitar el monitoreo en tiempo real de parámetros críticos —como la temperatura, humedad, presión, vibración y composición química— vinculados al desempeño y la seguridad de aeronaves y vehículos espaciales. El diseño de estos dispositivos exige materiales que no solo posean propiedades fisicoquímicas adecuadas, sino que también se alineen con los criterios actuales de sostenibilidad, eficiencia energética y mínima huella ecológica. Entre los materiales emergentes, la nanocelulosa biopolímero derivado de fuentes renovables como la madera y residuos agrícolas se ha posicionado como un candidato altamente prometedor en la fabricación de sensores inteligentes. Su combinación excepcional de propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, reológicas y electrónicas, junto con su biodegradabilidad y bajo costo, le confiere ventajas competitivas frente a materiales convencionales. Además, su capacidad para formar redes interconectadas en su microestructura permite una respuesta funcional bajo tensiones dinámicas, lo que la hace ideal para aplicaciones en entornos extremos. La posibilidad de producir materiales como papel transparente o modificar su comportamiento óptico mediante estructuras ordenadas de tipo quiral nemático¹, las cuales amplían significativamente su espectro de aplicación en fotónica y óptica adaptativa. Una característica distintiva es su estructura nemática quiral, la cual puede generar respuestas ópticas dependiendo de la distancia entre capas de nanocristales. Esta interacción con la luz produce cambios de color sin necesidad de pigmentos, lo que resulta útil en el desarrollo de sensores ópticos pasivos y adaptativos (Cultura Científica, n.d.). Asimismo, la inserción de heteroátomos en las capas cristalinas de la celulosa permite ampliar su funcionalidad, incrementando su sensibilidad y selectividad.

¹ Un cristal líquido quiral nemático, también conocido como fase colestérica, es una fase de cristal líquido en la que las moléculas poseen un orden orientacional similar al de la fase nemática, pero con una estructura helicoidal inducida por la quiralidad molecular. Esta helicidad surge porque las moléculas carecen de simetría especular (son quirales), lo que provoca una rotación continua del eje director (dirección promedio de orientación molecular) en el espacio, formando una hélice con un período característico conocido como paso de la hélice (de Gennes & Prost, 1993).

Estudios recientes reportan sensores híbridos formados por nanocelulosa y puntos cuánticos de grafeno, diseñados para detectar enzimas como las lacasas. Este enfoque aprovecha la biocompatibilidad y sostenibilidad de la nanocelulosa junto con la alta conductividad y sensibilidad del grafeno, lo que ha permitido el diseño de sensores con alto potencial de aplicación en biomedicina, monitoreo ambiental e industria alimentaria. (Agencia Sinc, n.d.). Esta combinación representa un avance hacia tecnologías más ecológicas y sofisticadas en el ámbito de los biosensores. La versatilidad de la nanocelulosa también se evidencia en su adopción en sectores como medicina regenerativa, construcción, electrónica flexible y el tratamiento ambiental. Su alta resistencia, bajo peso, biodegradabilidad y origen renovable consolidan su posición como un recurso clave para el desarrollo de tecnologías limpias y eficientes (Madera 21, n.d.). En esta tesis de maestría se desarrolla una revisión crítica y sistemática de la literatura científica reciente sobre el uso de nanocelulosa en sensores aplicados a entornos aeronáuticos y aeroespaciales. Mediante el análisis riguroso de literatura científica de alto impacto, se analizan desarrollos recientes en el diseño, modificación funcional e integración de sensores basados en nanocelulosa, incluyendo dispositivos piezoeléctricos, electroquímicos, ópticos y de humedad. Además, se identifican desafíos técnicos clave, incluyendo la estabilidad térmica, la resistencia a la radiación y la viabilidad de su producción a escala industrial. Como resultado, se propone una síntesis de oportunidades de investigación orientadas a impulsar la miniaturización, optimizar el consumo energético y garantizar la sostenibilidad en el diseño de sensores de próxima generación. Esta investigación busca consolidar fundamentos teóricos que orienten el diseño de sensores avanzados que incorporen materiales biobasados en configuraciones estructurales compatibles con los requerimientos del transporte aéreo y la exploración espacial sostenible.

Palabras clave: Nanocelulosa, sensores inteligentes, biobasados, tecnología aeroespacial, sostenibilidad, sensores ópticos.

Abstract

Innovation in functional materials is a fundamental pillar for the advancement of the aeronautical and aerospace industries—sectors that demand high standards of operational efficiency, structural reliability, safety, and environmental sustainability. In this context, advanced sensors play a strategic role by enabling real-time monitoring of critical parameters—such as temperature, humidity, pressure, vibration, and chemical composition—that are closely linked to the performance and safety of aircraft and spacecraft. The design of these devices requires materials that not only exhibit suitable physicochemical properties but also align with current criteria for sustainability, energy efficiency, and minimal ecological footprint. Among emerging materials, nanocellulose—a biopolymer derived from renewable sources such as wood and agricultural waste—has positioned itself as a highly promising candidate for the fabrication of smart sensors. Its exceptional combination of mechanical, thermal, optical, rheological, and electronic properties, along with its biodegradability and low cost, provides it with competitive advantages over conventional materials. Moreover, its ability to form interconnected networks at the microscale enables functional responsiveness under dynamic stresses, making it ideal for applications in extreme environments. The potential to produce materials such as transparent paper or to modify its optical behavior through chiral nematic ordered structures significantly expands its application range in photonics and adaptive optics. A distinctive feature is its chiral nematic arrangement, which can generate optical responses based on the spacing between nanocrystal layers. This light–matter interaction induces color changes without the need for pigments, proving valuable in the development of passive and adaptive optical sensors (Cultura Científica, n.d.). Additionally, the insertion of heteroatoms into the crystalline layers of cellulose further enhances its functionality, increasing its sensitivity and selectivity.

Recent studies report on the development of hybrid sensors composed of nanocellulose and graphene quantum dots, designed to detect enzymes such as laccases. This approach leverages the biocompatibility and sustainability of nanocellulose along with the high conductivity and sensitivity of graphene, enabling the creation of sensors with strong application potential in biomedicine, environmental monitoring, and the food industry (Agencia Sinc, n.d.). This combination represents a significant step forward toward greener and more sophisticated

technologies in the field of biosensors. The versatility of nanocellulose is also evident in its growing adoption across sectors such as regenerative medicine, construction, flexible electronics, and environmental remediation. Its high mechanical strength, low weight, biodegradability, and renewable origin consolidate its status as a key material for the development of clean and efficient technologies (Madera 21, n.d.).

This master's thesis proposes to conduct a critical and systematic review of the recent scientific literature on the use of nanocellulose in sensors applied to aeronautical and aerospace environments. Through a rigorous analysis of high-impact scientific sources, it examines recent developments in the design, functional modification, and integration of nanocellulose-based sensors, including piezoelectric, electrochemical, optical, and humidity sensing devices. Furthermore, key technical challenges are identified, such as thermal stability, radiation resistance, and the feasibility of large-scale production. As a result, a synthesis of research opportunities is proposed, aimed at promoting sensor miniaturization, optimizing energy consumption, and ensuring sustainability in the design of next-generation detection systems. This research seeks to consolidate the theoretical foundation for guiding the development of advanced sensors that incorporate biobased materials into structural configurations compatible with the requirements of advanced air transport and sustainable space exploration.

Keywords: Nanocellulose, smart sensors, biobased materials, aerospace technology, sustainability, optical sensors.

Introducción

La industria aeronáutica y aeroespacial se encuentra en una encrucijada tecnológica marcada por la necesidad de reconciliar el crecimiento operativo con los imperativos de sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y seguridad estructural. En este contexto, los sensores avanzados emergen como componentes críticos para el monitoreo en tiempo real de parámetros esenciales, tales como temperatura, humedad, presión, vibración y composición química del entorno, factores determinantes en la integridad y desempeño de aeronaves y vehículos espaciales (Kumar et al., 2022; Smith et al., 2006). El diseño de estos dispositivos exige materiales que no solo ofrezcan propiedades fisicoquímicas robustas, sino que también respondan a los principios de economía circular y bajo impacto ecológico, en consonancia con las regulaciones ambientales cada vez más exigentes.

Entre los materiales emergentes, la nanocelulosa, biopolímero derivado de fuentes renovables como la madera, residuos agrícolas y celulosa bacteriana, se ha consolidado como una alternativa prometedora gracias a su combinación singular de propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y electrónicas, junto con su biodegradabilidad, bajo costo y origen sostenible (Abitbol et al., 2016; Moon et al., 2011). Con dimensiones nanométricas (5–20 nm de diámetro) y relaciones de aspecto elevadas, la nanocelulosa exhibe una resistencia mecánica que puede alcanzar hasta 150 GPa, superando en muchos casos a materiales convencionales, al tiempo que mantiene una densidad inferior a la del aluminio (Mishra et al., 2020; Habibi et al., 2010). Estas características le confieren una ventaja competitiva en aplicaciones donde la ligereza, la resistencia y la estabilidad térmica hasta 300 °C en el caso de los nanocristales de celulosa (CNC) son cruciales (Smith et al., 2006; Moon et al., 2011).

Además de sus propiedades estructurales, la nanocelulosa posee una alta área superficial (150–300 m²/g) y una superficie funcionalizable, lo que permite su integración con nanomateriales como grafeno, puntos cuánticos o nanopartículas metálicas para desarrollar sensores híbridos con alta sensibilidad, selectividad y respuesta rápida (Zhang et al., 2022; Ching et al., 2020). Un ejemplo destacado es la combinación de nanocelulosa con puntos cuánticos de grafeno para la detección enzimática de lacasas, una aproximación que demuestra su potencial en biosensores con aplicaciones biomédicas y ambientales (Agencia Sinc, s. f.). Asimismo, su capacidad para

autoensamblarse en estructuras coloidales de tipo nemático quiral permite la generación de respuestas ópticas sin pigmentos, abriendo caminos en sensores ópticos pasivos y materiales fotónicos (Cultura Científica, 2017).

A pesar de estos avances, persiste una brecha crítica en la literatura científica: la ausencia de una revisión sistemática y crítica que sintetice de manera rigurosa las evidencias sobre el uso de nanocelulosa en sensores aplicados específicamente a entornos aeronáuticos y aeroespaciales. Esta carencia fragmenta el conocimiento, obstaculiza la identificación de vacíos tecnológicos y limita la transferencia de innovaciones hacia el sector productivo (Shoiynbayeva et al., 2021b). En particular, se requiere evaluar no solo el desempeño de estos sensores en condiciones extremas — altas temperaturas, radiación cósmica, presión reducida— sino también su escalabilidad industrial, su ciclo de vida ambiental y la existencia de normativas de certificación que respalden su implementación segura (Habibi et al., 2010; Liu, 2024).

Por estas razones, esta tesis emprende una revisión sistemática de la literatura, guiada por el protocolo PRISMA-P, con el objetivo de evaluar las implicaciones técnicas, funcionales y ambientales del uso de la nanocelulosa como material base en sensores avanzados para las industrias aeronáutica y aeroespacial. A través del análisis riguroso de investigaciones recientes de alto impacto, se busca consolidar un marco teórico robusto que oriente el diseño de sensores sostenibles, eficientes y compatibles con los requisitos operativos de la exploración aérea y espacial del futuro.

1. Planteamiento del problema

1.1. Contexto General de la Ciencia de los Materiales y la nanotecnología.

Particularmente, la nanocelulosa ha emergido como un material prometedor por su alta resistencia, bajo peso, biodegradabilidad y versatilidad funcional (nanociencia y nanotecnología entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, n.d.). En el campo aeronáutico, su uso es relativamente reciente, pero ha mostrado gran potencial. La nanotecnología ha permitido optimizar compuestos convencionales y ha facilitado el desarrollo de nuevas estructuras con propiedades avanzadas mediante el uso de fuentes naturales. Los avances en nanocelulosa permitirán adaptar sus extraordinarias propiedades estructurales a aplicaciones clave en los campos de la energía, la caracterización y mejora de materiales, la nanoelectrónica, la producción de membranas o la nanobioteconología.

Los avances en los campos de la celulosa nanoestructurada y de la nanotecnología van a permitir adaptar las extraordinarias propiedades estructurales del material celulósico a aplicaciones tan diversas en aplicaciones de vanguardia tecnológica como los campos energéticos, la caracterización y mejora de materiales, la nanoelectrónica, la producción de membranas, el desarrollo de nuevos materiales con propiedades innovadoras o la nanobioteconología (Devreese, 2007).

A nivel internacional, diversos centros de investigación han logrado avances notables en la aplicación de nanocelulosa en el ámbito aeronáutico. En Suecia, el KTH Royal Institute of Technology ha sido pionero en este campo, destacándose en 2015 con el desarrollo de un sensor de humedad ultraligero, diseñado por un equipo liderado por el Dr. Lars Berglund. Este sensor, fabricado con nanocelulosa, ha mostrado alto rendimiento en aplicaciones aeronáuticas, gracias a su bajo peso y elevada sensibilidad. (Shoynbayeva et al., 2021a). En Japón, la Universidad de Tokio, en colaboración con la empresa Oji Holdings, ha avanzado significativamente en la creación de sensores flexibles basados en

nanocelulosa. En 2018, desarrollaron un sensor de presión y temperatura que podría integrarse en estructuras aeronáuticas para monitoreo en tiempo real (Marchetti et al., 2006). En Estados Unidos, la Universidad de Purdue se ha consolidado como un referente en la investigación de nanocelulosa para aplicaciones aeroespaciales. En 2019, un equipo liderado por el Dr. Jeffrey Youngblood diseñó un sensor de tensión utilizando nanocelulosa cristalina, que mostró una excepcional sensibilidad y durabilidad en condiciones de vuelo simuladas (Alfaro Flores et al., 2024). Además, en Finlandia, el VTT Technical Research Centre ha desarrollado sensores de nanocelulosa para detectar formación de hielo en las alas de aeronaves, un riesgo significativo que compromete la seguridad del vuelo. (Yang et al., 2020). En Canadá, la Universidad de British Columbia, en colaboración con Boeing, ha creado prototipos de sensores de presión basados en nanocelulosa, orientados a la detección precisa de fallos estructurales en componentes críticos de aeronaves (Ma et al., 2023). Por último, en China, la Universidad de Tsinghua ha demostrado el potencial de la nanocelulosa en sensores de gas para la detección de compuestos volátiles en las cabinas de los aviones, contribuyendo a mejorar la calidad del aire y la seguridad a bordo (Reshmy et al., 2020).

En América Latina, aunque se reconoce el potencial de la aeronáutica como motor de desarrollo económico, aún existe un retraso en la investigación y aplicación de materiales avanzados en este sector. Sin embargo, países como Brasil, Chile, Argentina y México han realizado avances notables en la investigación de nanocelulosa y sus aplicaciones en sensores (Desarrollo de Compuestos Biohíbridos Base Celulosa, n.d.-a). Brasil es uno de los líderes en Latinoamérica en investigación sobre nanocelulosa y sus aplicaciones, por ejemplo, en la Universidad de Sao Paulo (USP) ha realizado investigaciones sobre el uso de Nanocelulosa en sensores. En 2019, un equipo liderado por la Doctora Denise Petri desarrolló un sensor basado en nanocelulosa para detectar humedad, que podría tener aplicaciones en la industria aeronáutica. La empresa brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA) ha trabajado en la producción de nanocelulosa a partir de fibras de coco y otras fuentes naturales explorando su potencial uso de sensores (Álvarez-Láinez, M. L., Martínez-Tejada, H. V., & Jaramillo Isaza, F. (2019).

En la Universidad de Concepción en Chile se ha realizado investigaciones lideradas por el Doctor Aldo González Becerra donde ha estudiado las propiedades mecánicas y

eléctricas de la nanocelulosa, para potenciar materiales conductores. En Argentina el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) ha realizado investigaciones sobre nanocelulosa, aunque su aplicación en sensores aeronáuticos se encuentra en etapas iniciales, en colaboración con la Universidad de Buenos Aires ha trabajado en la caracterización de nanocelulosa obtenida de diferentes fuentes, incluyendo residuos agroindustriales (» Nanocelulosa_ Un Material Revolucionario Con Amplias Posibilidades de Uso, n.d.). En el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en México, un equipo liderado por la Doctora Lluvia López ha estudiado la modificación química de nanocelulosa para mejorar sus propiedades y compatibilidad.

En particular, Colombia ha mostrado avances en la tecnología de materiales, pero el uso de nanomateriales en aplicaciones industriales sigue siendo limitado (Giraldo Gallo et al., 2007). A pesar de los esfuerzos del gobierno colombiano y de diversas instituciones educativas para fomentar la investigación en ciencia de materiales, persisten barreras, tales como la falta de infraestructura adecuada, inversión insuficiente en I+D y la escasa colaboración entre la academia y la industria (TJFC1de1 Nanociencia, n.d.).

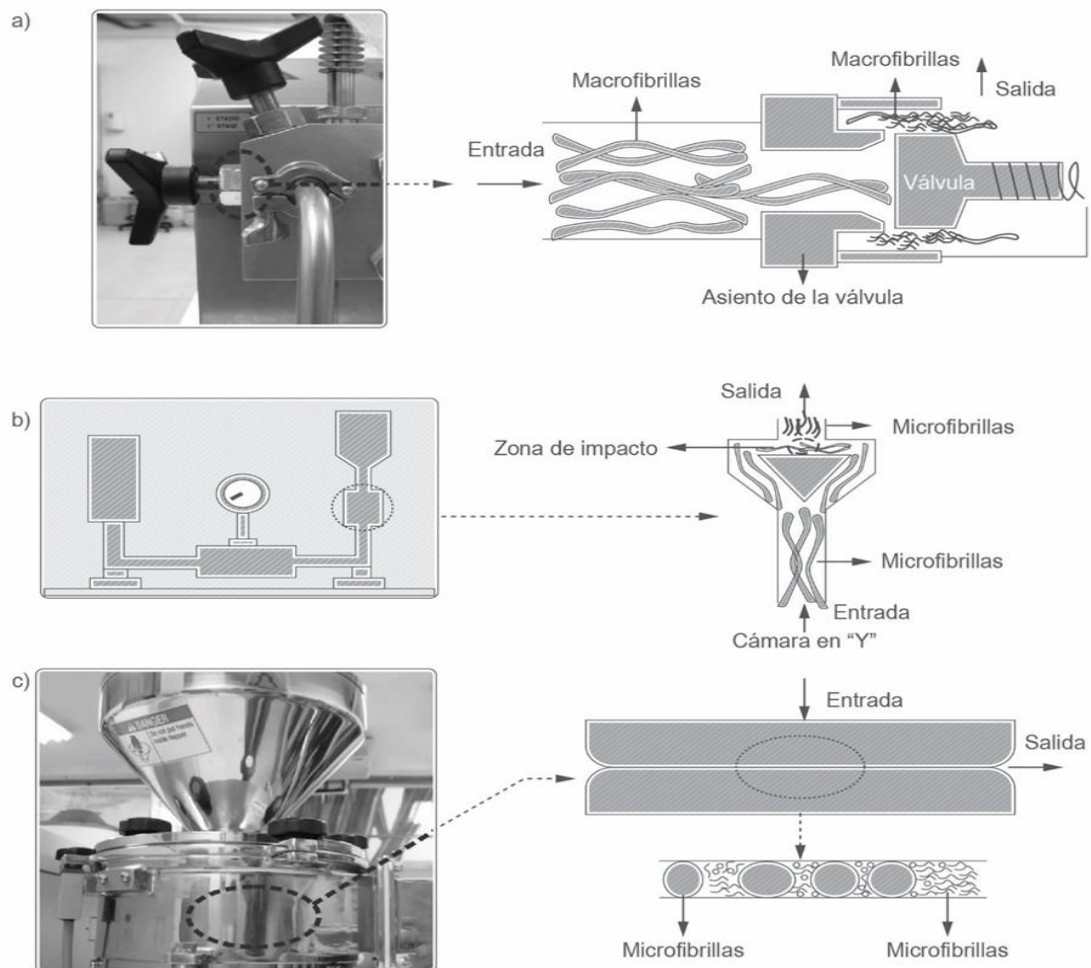
La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) ha realizado investigaciones significativas en el desarrollo de sensores basados en nanocelulosa, destacándose en la creación de compuestos biohíbridos que combina celulosa con nanoestructuras de carbono. Estos avances se centran en la mejora de propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales, así como en su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía, como supercondensadores dispositivos promisorios para la industria aeronáutica y aeroespacial (Zuluaga Gallego et al., 2024).

Se han investigado compuestos que integran nanocelulosa y grafeno, los cuales presentan características mejoradas como alta potencia y buena capacitancia específica. Sin embargo, se identifican desafíos como la baja densidad de energía y la alta resistencia interna que requieren soluciones como la funcionalización o el dopaje con óxidos metálicos para mejorar su eficiencia. La celulosa ofrece ventajas tales como flexibilidad mecánica, biodegradabilidad y la capacidad de modificar su área superficial a través de tratamientos térmicos. Esto permite un mejor contacto entre el material activo del electrodo y el electrolito, facilitando la difusión de iones y mejorando el rendimiento del dispositivo. La

investigación también se ha orientado hacia el desarrollo de sistemas de liberación controlada y sensores que utilizan nanocelulosa por sus propiedades únicas. Se ha investigado su comportamiento sensorial en contextos biomédicos y ambientales, particularmente su capacidad para detectar variaciones fisicoquímicas asociadas a cambios en el entorno o en sistemas biológicos (Gañán et al., n.d.) (Figura 1).

Figura 1

Tratamientos mecánicos para obtener nanocelulosa: a) homogeneización, b) grinder y c) microfluidizador.



Nota. Fuente Tomado de Álvarez-Láinez, M. L., Martínez Tejada, H. V. y Jaramillo Isaza, F. 2020, Nanotecnología fundamentos y aplicaciones. Universidad de Antioquia.

La UPB continúa explorando nuevas arquitecturas funcionales a partir de nanocelulosa y materiales nanoestructurados, donde se busca aumentar la densidad de energía y reducir la resistencia interna mediante innovaciones en los materiales utilizados.

Las causas que subyacen a esta situación son multidimensionales. La infraestructura limitada para la investigación avanzada, sumada a la baja inversión en tecnología, genera un ciclo de desarrollo lento. Las consecuencias son palpables: los productos colombianos no son competitivos a nivel internacional, y la industria depende en gran medida de la importación de tecnología y materiales especializados, lo que limita su capacidad para innovar (Del Arte La Nanotecnología Relacionado Al Medio Ambiente Y La Sostenibilidad, n.d.)

En Colombia la Universidad Nacional (UNAL) ha sido pionera en la investigación de nanomateriales a través del grupo de macromoléculas liderado por el Doctor Jairo Perilla, donde ha desarrollado métodos para extraer celulosa de residuos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar y las fibras de plátano, también ha realizado caracterización de propiedades mecánicas de la nanocelulosa que podrían ser relevantes para la fabricación e implementación de sensores (Saldarriaga et al., 2007). La Universidad de los Andes por intermedio del grupo de investigación en ingeniería biomédica liderado por la Doctora Carolina Muñoz ha explorado el uso de nanocelulosa en biosensores para la detección de glucosa, mejorando la sensibilidad y estabilidad de esos instrumentos (Desarrollo de Compuestos Biohíbridos Base Celulosa, n.d.-b).

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) ha realizado investigaciones que podrían tener aplicaciones en la industria aeroespacial, en el Grupo de Investigación en Nuevos Materiales se han venido mejorando las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos mediante la adición de nanocelulosa, potencializando el desarrollo de materiales ligeros y resistentes que podrían usarse en estructuras aeronáuticas, de igual manera el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) ha desarrollado métodos funcionales y exploración eléctrica de la nanocelulosa para el desarrollo de sensores (Patente Proceso Para Producir Celulosa Bacteriana En Presencia de Un Agente Químico de Entrecruzamiento UPB, n.d.).

1.2 Formulación del problema:

Pese al creciente interés por el uso de nanocelulosa en sensores inteligentes, aún no existe una revisión sistemática y crítica que sintetice sus implicaciones técnicas, funcionales y ambientales en contextos aeronáuticos y aeroespaciales. Esta ausencia genera consecuencias relevantes: en el plano científico, limita la consolidación de un marco teórico robusto, fragmenta el conocimiento y dificulta la identificación de vacíos críticos de investigación; y en el plano tecnológico, retrasa la adopción industrial, obstaculiza la creación de normativas de certificación, reduce la competitividad regional y dificulta la transferencia efectiva de innovaciones hacia el sector productivo.

La presente investigación busca llenar ese vacío mediante una revisión rigurosa bajo la metodología PRISMA, consolidando así una base de evidencia que oriente tanto la investigación futura como la toma de decisiones en la industria aeroespacial. El objetivo principal es evaluar las implicaciones y perspectivas del uso de la nanocelulosa como material base para sensores con aplicaciones en la industria aeronáutica y aeroespacial, con énfasis en la sostenibilidad, funcionalidad y eficiencia operativa.

2. Justificación

Esta investigación contribuirá a consolidar una base teórica y técnica para la aplicación de nanocelulosa en sensores aeronáuticos, promoviendo el uso de materiales biodegradables con bajo impacto ambiental. El abordaje sistemático de esta temática mediante el método PRISMA (2022) permitirá identificar vacíos, desafíos y oportunidades de desarrollo tecnológico en Colombia y América Latina, fomentando la innovación local y la colaboración interdisciplinaria. Además, los resultados podrían trasladarse a otras industrias (biomedicina, construcción, electrónica flexible), ampliando el impacto científico y social del proyecto. En el desarrollo de biosensores basados en nanocelulosa, es fundamental no solo innovar en su funcionalidad y eficiencia, sino también mitigar sus efectos ambientales mediante estrategias que reduzcan la huella de carbono asociada a su producción y uso. Para ello, se deben implementar procesos sostenibles que disminuyan el impacto ecológico durante todo el ciclo de vida del dispositivo. Además, resulta crucial evaluar la disponibilidad final de los componentes una vez que estos culminen su ciclo útil, asegurando que puedan ser reciclados, reutilizados o degradados de manera segura para el medio ambiente, promoviendo así una economía circular en la industria de los dispositivos biosensores (se busca no solo explorar las propiedades fisicoquímicas de la nanocelulosa, sus métodos de obtención y transformación, sino también contribuir al desarrollo de diseños más eficientes y seguros para sensores aeronáuticos, teniendo en cuenta su bajo impacto ambiental, biodegradabilidad y capacidad para mitigar la huella de carbono). El avance en la resolución del problema relacionado con sensores basados en nanocelulosa se centrará en el estudio de sus propiedades específicas, profundizando en cómo características únicas como su alta resistencia, baja densidad y biodegradabilidad pueden ser aprovechadas en aplicaciones aeronáuticas. Además, se indagará sobre los métodos de funcionalización para potenciar el rendimiento de este material en sistemas de sensores, lo que podría generar nuevos descubrimientos en química de materiales. También se investigará la interacción de la nanocelulosa con otros componentes en sistemas complejos, proporcionando información clave para el diseño de materiales compuestos innovadores. Finalmente, se hará revisión sobre el comportamiento de la nanocelulosa bajo las condiciones extremas típicas de la industria aeroespacial, como altas altitudes, cambios bruscos de presión y temperaturas extremas, lo que permitirá obtener datos cruciales sobre su resistencia y durabilidad

(Devreese, 2007). Este enfoque integral no solo ampliará el conocimiento científico sobre la nanocelulosa, sino que también abrirá nuevas posibilidades para su aplicación en tecnologías avanzadas. La investigación sobre aplicaciones de nanocelulosa en sensores aeronáuticos generará beneficios significativos para futuras investigaciones, destacándose la creación de una base de datos propia que sistematice información clave sobre el rendimiento de este material en aplicaciones prácticas. Esta curaduría eficiente, desarrollada bajo el método PRISMA (2022), permitirá organizar y analizar los resultados obtenidos, estableciendo un punto de partida sólido para estudios posteriores. Además, se desarrollarán metodologías específicas para probar y evaluar sensores basados en nanocelulosa, las cuales podrían ser refinadas y adaptadas en investigaciones futuras. La identificación de desafíos técnicos propios, como limitaciones en la integración de esta tecnología o su comportamiento en condiciones extremas, orientará esfuerzos hacia soluciones innovadoras. Al mismo tiempo, la previsión del potencial uso de esta tecnología en el mediano y largo plazo abrirá nuevas oportunidades de colaboración interdisciplinaria entre expertos en nanomateriales, ingeniería aeroespacial y ciencia de sensores. Este trabajo también podría estimular la innovación local en Colombia, promoviendo el desarrollo de un clúster especializado en nanomateriales para aplicaciones aeroespaciales, lo que contribuiría al fortalecimiento de la industria nacional y al posicionamiento internacional del país. En cuanto a los beneficios para la sociedad, esta investigación tendrá impactos directos e indirectos de gran relevancia. Directamente, los sensores basados en nanocelulosa podrían mejorar la seguridad aérea mediante la detección temprana de problemas en aeronaves, optimizando así la confiabilidad de los sistemas de monitoreo. Además, el uso de este material biodegradable reduciría el impacto ambiental de la industria aeroespacial, promoviendo la sostenibilidad y agregando valor a productos celulósicos tradicionales. Los sensores más ligeros y eficientes también contribuirían a la eficiencia energética, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. Indirectamente, el avance en esta tecnología impulsaría el desarrollo económico de Colombia, generando empleos y atrayendo inversión extranjera. Asimismo, los conocimientos adquiridos podrían transferirse a otros sectores, como la medicina o la electrónica de consumo, beneficiando a la sociedad en general.

La inspiración que esta investigación podría generar en jóvenes científicos e ingenieros, junto con el fortalecimiento del posicionamiento internacional del país, consolidaría a Colombia

como un actor clave en la comunidad científica global, promoviendo innovaciones en industrias relacionadas, como drones y vehículos autónomos.

2.1. Pregunta de Investigación

En concordancia con el marco de la presente tesis, que se centra en las implicaciones del uso de nanocelulosa en sensores avanzados para la eficiencia, sostenibilidad y desarrollo de las industrias aeronáutica y aeroespacial, se formula la siguiente pregunta orientadora:

¿De qué manera una revisión sistemática y crítica de la literatura sobre sensores basados en nanocelulosa puede aportar evidencia científica y tecnológica que oriente el diseño, la sostenibilidad y la viabilidad de estos dispositivos en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales?

La formulación de esta pregunta de investigación se justifica en la necesidad de superar la brecha crítica identificada: la ausencia de una revisión sistemática y crítica que organice, compare y evalúe la evidencia existente sobre el uso de nanocelulosa en sensores aplicados a la industria aeronáutica y aeroespacial. Sin esta síntesis, el conocimiento científico permanece fragmentado, lo que limita la identificación de vacíos, la consolidación de marcos teóricos y la reproducibilidad de los hallazgos. Al mismo tiempo, la falta de evidencia estructurada dificulta la toma de decisiones en la industria, retrasa la creación de normativas de certificación y frena la transferencia tecnológica hacia aplicaciones reales.

En este sentido, una revisión sistemática rigurosa no solo permitirá integrar los avances recientes en torno a las propiedades, diseños y aplicaciones de la nanocelulosa en sensores, sino que también aportará bases sólidas para orientar desarrollos futuros, garantizando sostenibilidad, viabilidad tecnológica y competitividad en el sector aeroespacial.

La industria aeronáutica y aeroespacial se caracteriza por su alta exigencia tecnológica, orientada a garantizar eficiencia operativa, seguridad estructural y sostenibilidad ambiental. En este contexto, los avances en nanotecnología y el desarrollo de materiales biodegradables como la nanocelulosa han despertado un creciente interés por su potencial para sustituir materiales convencionales en aplicaciones críticas, como la fabricación de sensores inteligentes. Sin embargo, pese a sus reconocidas propiedades, existe una limitada comprensión sobre su desempeño real

frente a los materiales tradicionalmente empleados en sensores para condiciones aeroespaciales, lo cual dificulta su adopción tecnológica informada (Álvarez et al., 2019). La nanocelulosa, por su origen renovable, alta resistencia mecánica, ligereza, flexibilidad, capacidad de funcionalización y biodegradabilidad, se presenta como una alternativa prometedora para el desarrollo de sensores más sostenibles, sensibles y eficientes. Su estructura nanoestructurada permite respuestas funcionales bajo estímulos físicos y químicos diversos, lo que resulta clave para entornos hostiles como los que caracterizan a la aviación y la exploración espacial (Smith et al., 2006).

Además, en un escenario donde las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas, la incorporación de materiales biobasados como la nanocelulosa podría contribuir a la reducción de la huella ecológica de las operaciones aeroespaciales. Los sensores derivados de celulosa/nanocelulosa ofrecen propiedades únicas como bajo peso, capacidad de detección de parámetros fisicoquímicos y adaptabilidad estructural, lo cual los posiciona como una solución innovadora con impacto ambiental reducido (Liu, 2024). La investigación y el desarrollo de sensores a base de nanocelulosa representa también una oportunidad estratégica para fortalecer la competitividad e innovación del sector, tanto en el ámbito industrial como académico. Comprender a profundidad las ventajas comparativas de estos dispositivos contribuirá al avance del conocimiento en nanotecnología aplicada a la industria aeronáutica y aeroespacial, al tiempo que permitirá explorar nuevas vías para la integración de tecnologías limpias y funcionales (Rezapour et al., 2017).

Por ello, esta tesis propone realizar una revisión sistemática del estado del arte sobre la nanocelulosa aplicada al desarrollo de sensores avanzados, utilizando la metodología PRISMA-P para garantizar el rigor, transparencia y reproducibilidad del análisis. Este enfoque permitirá no solo sintetizar la evidencia científica más reciente, sino también identificar vacíos críticos en la literatura, como la escalabilidad industrial de estos sensores o la ausencia de normativas específicas para su implementación segura y eficaz en aplicaciones aeroespaciales

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar las implicaciones y perspectivas del uso de la nanocelulosa como material base en el diseño de sensores aplicables a las industrias aeronáutica y aeroespacial, mediante una revisión crítica del estado del arte, con énfasis en la sostenibilidad, funcionalidad y eficiencia operativa.

3.2 Objetivos específicos

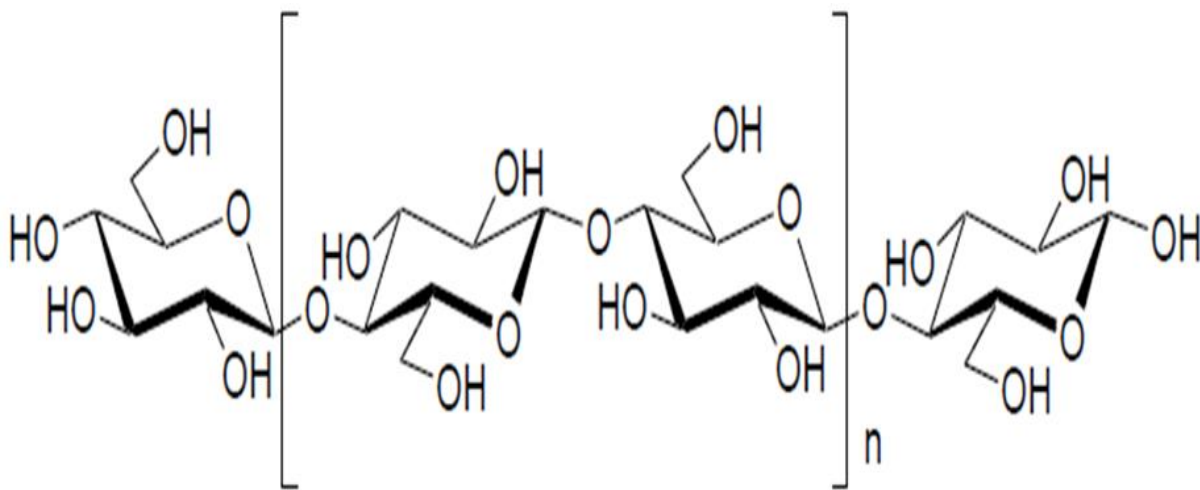
1. Revisar y sistematizar la literatura científica reciente sobre el desarrollo y aplicación de sensores basados en nanocelulosa en contextos aeronáuticos y aeroespaciales.
2. Utilizar técnicas o metodologías de cienciometría para organizar la información bibliográfica sobre sensores basados en nanocelulosa en la industria aeronáutica y aeroespacial.
3. Analizar las propiedades clave de la nanocelulosa (mecánicas, térmicas, eléctricas y biodegradables) que fundamentan su uso en sensores avanzados para entornos extremos.
4. Identificar y clasificar los tipos de sensores funcionales desarrollados con nanocelulosa, sus mecanismos de funcionamiento, arquitecturas y áreas de aplicación dentro del sector aeroespacial.
5. Establecer un análisis crítico proyectivo que permita reconocer vacíos de conocimiento, desafíos tecnológicos y oportunidades de innovación sostenible para el uso futuro de sensores de nanocelulosa en sistemas aeronáuticos y espaciales.

4. Marco teórico

El prefijo nano proviene del latín "nanus" que significa muy pequeño o enano y en términos físicos es el prefijo para referirse a la milmillonésima parte de algo (10^{-9}) (serena y correa, 2009).

Figura 2

Estructura química de la Nanocelulosa

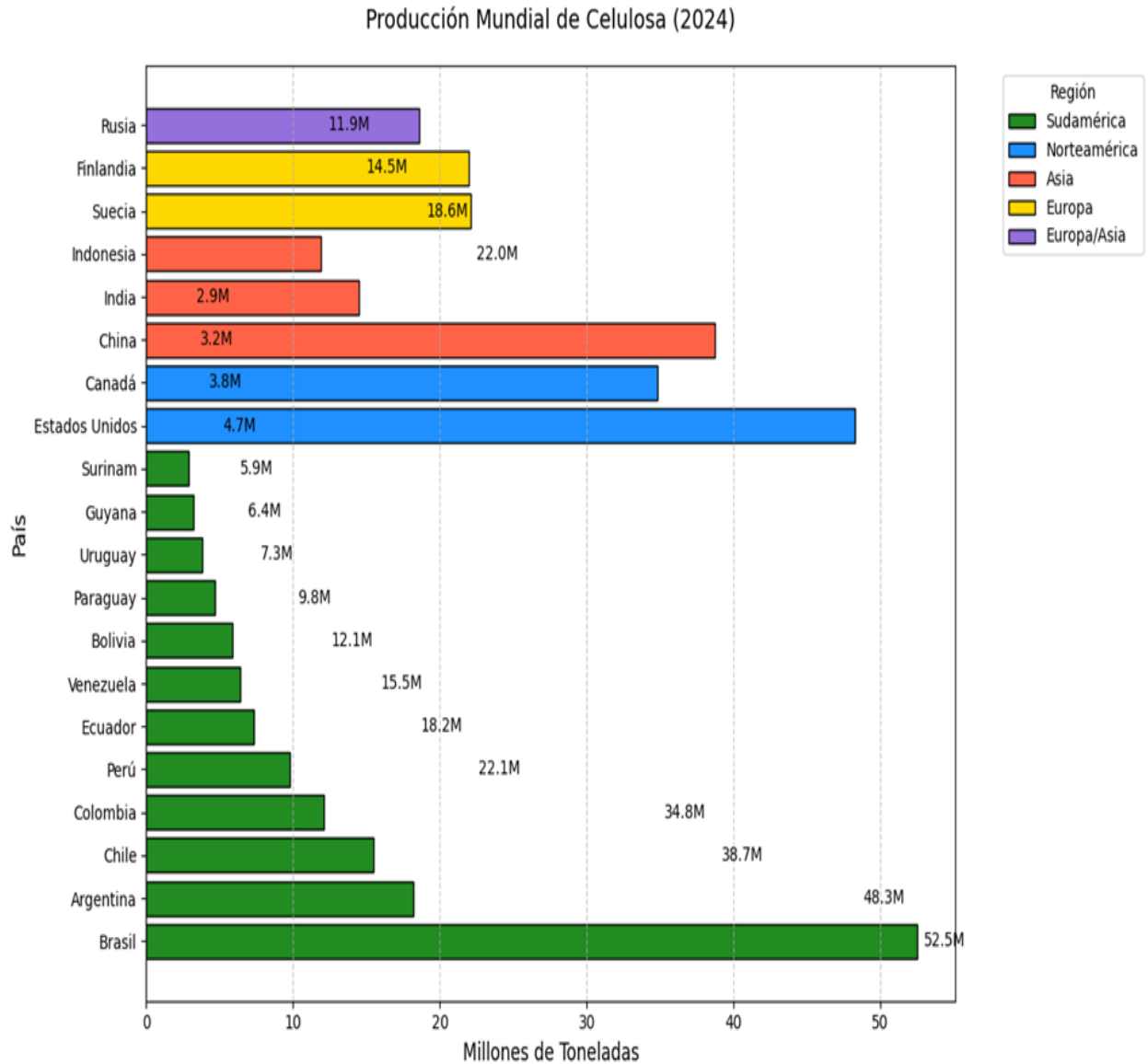


Nota. Tomado de Siqueira G, Bras J, Dufresne A. Cellulosic bionanocomposites: a review of preparation, properties and applications. Polymers. 2010;2:728-65.

La celulosa es un polímero natural compuesto por unidades de β -D-glucopiranosas, unidas mediante enlaces tipo β -(1 \rightarrow 4). Su origen puede ser vegetal o bacteriano. En las plantas particularmente, constituye la base estructural de la pared celular vegetal (Klemm et al., 2005). Su estructura semicristalina, con regiones ordenadas y amorfas, permite su descomposición en nanoescala mediante métodos mecánicos, químicos o enzimáticos, dando origen a la nanocelulosa como aparece en la figura 2 (Habibi et al., 2010). Este material, con dimensiones nanométricas (5-20 nm de diámetro y relaciones de aspecto elevadas), exhibe propiedades superiores a la celulosa macroscópica, como alta resistencia mecánica (hasta 10 GPa), estabilidad térmica (hasta 300°C) y reactividad superficial, lo que la convierte en un candidato clave para aplicaciones avanzadas (Moon et al., 2011).

Figura 3

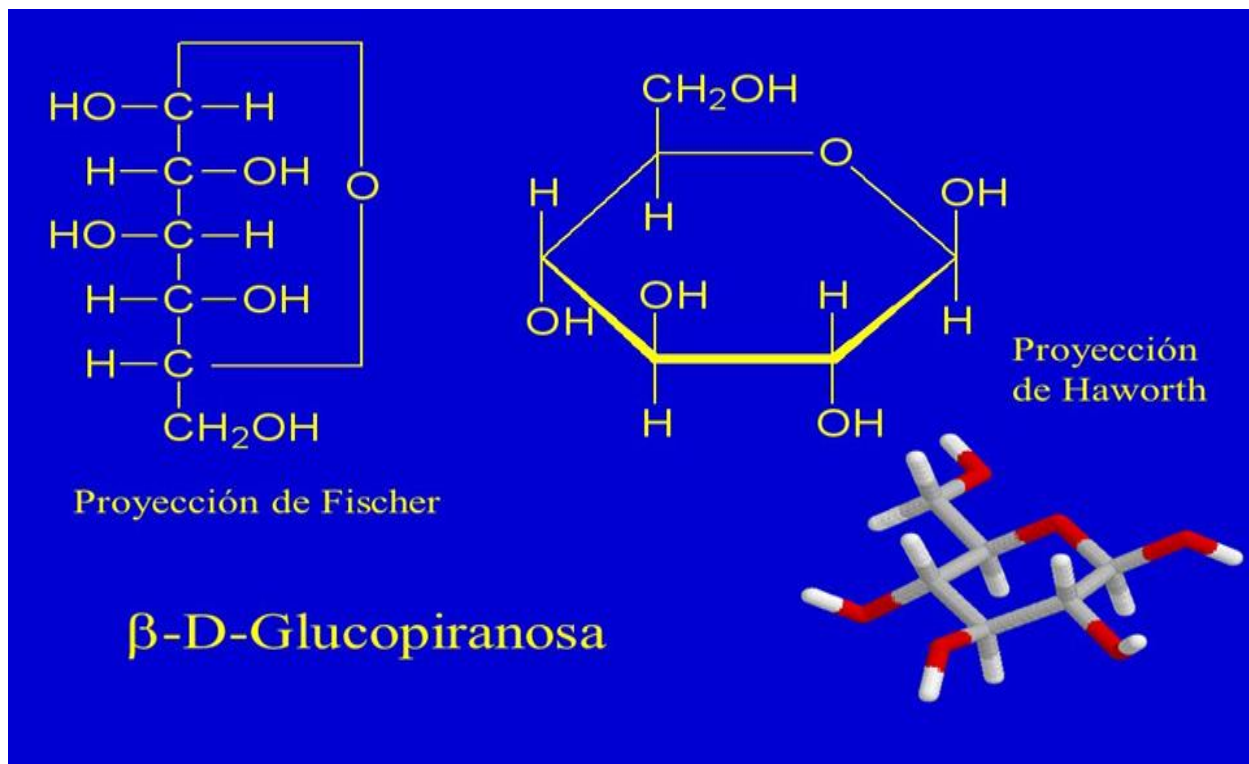
Producción por toneladas de celulosa a nivel mundial.



Nota. Fuente FAOSTAT (Organización de la ONU para la Agricultura y Alimentación).

Figura 4

Estructura química y molecular de la Glucopiranososa.



Nota. Fuente Pérez, J. 2020. Química Orgánica. Editorial Universitaria.

La nanocelulosa se subdivide en nanocristales de celulosa (CNC, por sus siglas en inglés Crystalline Nanocellulose), obtenidos por hidrólisis ácida que elimina las zonas amorfas, y nanofibras de celulosa (CNF, por sus siglas en inglés Cellulose Nanofibers), producidas por desintegración mecánica o tratamiento enzimático (Tang et al., 2020). Los CNC destacan por su rigidez y capacidad de autoensamblado en estructuras coloidales, mientras que las CNF muestran flexibilidad y entrelazamiento, ideales para matrices compuestas (Eichhorn et al., 2010). Estas diferencias estructurales influyen en su aplicabilidad: los CNC se emplean en sensores ópticos y electrónicos, mientras que las CNF son preferidas en materiales flexibles y biodegradables (Jorfi et al., 2021). La nanocelulosa ha ganado relevancia en aplicaciones ópticas y electrónicas debido a sus propiedades únicas, como su alta transparencia, baja rugosidad superficial, conductividad ajustable y capacidad de autoensamblado. Los nanocristales de celulosa (CNC), en particular,

destacan por su capacidad de formar estructuras coloidales ordenadas conocidas como cristales fotónicos, los cuales pueden modular la luz de manera eficiente. Esto los hace ideales para el desarrollo de sensores ópticos, dispositivos de visualización y recubrimientos antirreflejo (Habibi et al., 2010). Además, los CNC presentan birrefringencia inherente, lo que les permite manipular la polarización de la luz, una propiedad clave en aplicaciones avanzadas de óptica (Revol et al., 1992). Por otro lado, las nanofibras de celulosa (CNF) han mostrado un gran potencial en aplicaciones electrónicas debido a su flexibilidad mecánica y compatibilidad con otros materiales conductores. Las CNF pueden combinarse con polímeros conductores o nanopartículas metálicas para formar compuestos con propiedades eléctricas mejoradas (Henriksson et al., 2008). Estos materiales híbridos son prometedores para el desarrollo de dispositivos electrónicos flexibles, como pantallas táctiles, sensores de presión y baterías de iones de litio (Zhang et al., 2019). Además, la biodegradabilidad de las CNF las convierte en una alternativa sostenible para la fabricación de componentes electrónicos ecológicos (Klemm et al., 2018).

La nanocelulosa ha emergido como un material clave para el desarrollo de sensores avanzados, especialmente en sectores estratégicos como la industria aeronáutica y aeroespacial. Su obtención y procesamiento parten principalmente de fuentes renovables como la celulosa extraída de plantas, residuos agrícolas o incluso bacterias (Kumar et al., 2022). Estos materiales base son sometidos a procesos de extracción y nanofibrilación que permiten obtener estructuras nanométricas con propiedades excepcionales, como alta resistencia mecánica, biodegradabilidad y capacidad de funcionalización química como se muestra en la figura 3.

El proceso de extracción de celulosa implica la eliminación de lignina, hemicelulosas y otras impurezas presentes en las fuentes vegetales. Este paso se logra mediante métodos químicos, como el tratamiento con hidróxido de sodio o clorito de sodio, los cuales descomponen selectivamente los componentes no celulósicos (Habibi et al., 2010). Una vez purificada, la celulosa es procesada para obtener nanocelulosa mediante técnicas de nanofibrilación, que pueden ser mecánicas, químicas o combinaciones de ambas. Los métodos mecánicos incluyen la molienda de alta intensidad, la homogeneización a alta presión y la sonicación, que descomponen las fibras celulósicas en nanoescalas (Moon et al., 2011). Aunque efectivos, estos métodos suelen requerir altos niveles de energía, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas más eficientes. Por otro

lado, los métodos químicos, como la oxidación con ácido 2,2,6,6-tetrametilpiperidin-1-oxil (TEMPO), han demostrado ser prometedores para producir nanocelulosa de alta pureza y uniformidad (Isogai et al., 2011). Este enfoque genera nanofibras de celulosa con grupos carboxílicos en su superficie, lo que facilita su dispersión en medios acuosos y mejora su compatibilidad con otros materiales. Además, los métodos enzimáticos, que emplean enzimas como celulasas, ofrecen una alternativa más sostenible y específica para descomponer la celulosa en nanoestructuras, minimizando el impacto ambiental asociado con procesos químicos intensivos (Shoiynbayeva et al., 2021). Una vez obtenida la nanocelulosa, su funcionalización y modificaciones superficiales son cruciales para adaptarla a aplicaciones electrónicas y sensoriales figura 4.

La funcionalización puede realizarse mediante tratamientos químicos que introducen grupos funcionales específicos, como aminas, tiol o grupos éster, que mejoran la interacción de la nanocelulosa con polímeros conductores, nanopartículas metálicas u otros materiales funcionales (Ching et al., 2020). Por ejemplo, la combinación de nanocelulosa con puntos cuánticos de grafeno ha permitido el desarrollo de sensores capaces de detectar enzimas con alta sensibilidad y precisión (Gañán et al., n.d.). Estas modificaciones también mejoran la conductividad eléctrica y la estabilidad térmica del material, características esenciales para su uso en dispositivos electrónicos avanzados. Además, las modificaciones superficiales permiten ajustar las propiedades de la nanocelulosa para aplicaciones específicas, como sensores piezoeléctricos o electroquímicos. Por ejemplo, la funcionalización con materiales piezoeléctricos como el PVDF (polifluoruro de vinilideno) ha resultado en sensores capaces de detectar vibraciones y movimientos con alta precisión, ideales para monitorear estructuras en entornos aeroespaciales (Liu, 2024). Estas innovaciones tecnológicas no solo amplían el rango de aplicaciones de la nanocelulosa, sino que también contribuyen a la sostenibilidad al reemplazar materiales sintéticos derivados del petróleo con alternativas renovables y biodegradables. Tanto los CNC como las CNF presentan ventajas destacadas en estabilidad térmica y química, atributos que los hacen adecuados para entornos extremos. Estas propiedades permiten su integración en dispositivos que deben operar bajo temperaturas elevadas, variaciones de presión y exposición a agentes corrosivos, como ocurre en la industria aeroespacial (Moon et al., 2011). La estabilidad térmica de estos materiales permite que mantengan sus propiedades mecánicas y estructurales incluso a temperaturas elevadas, lo que

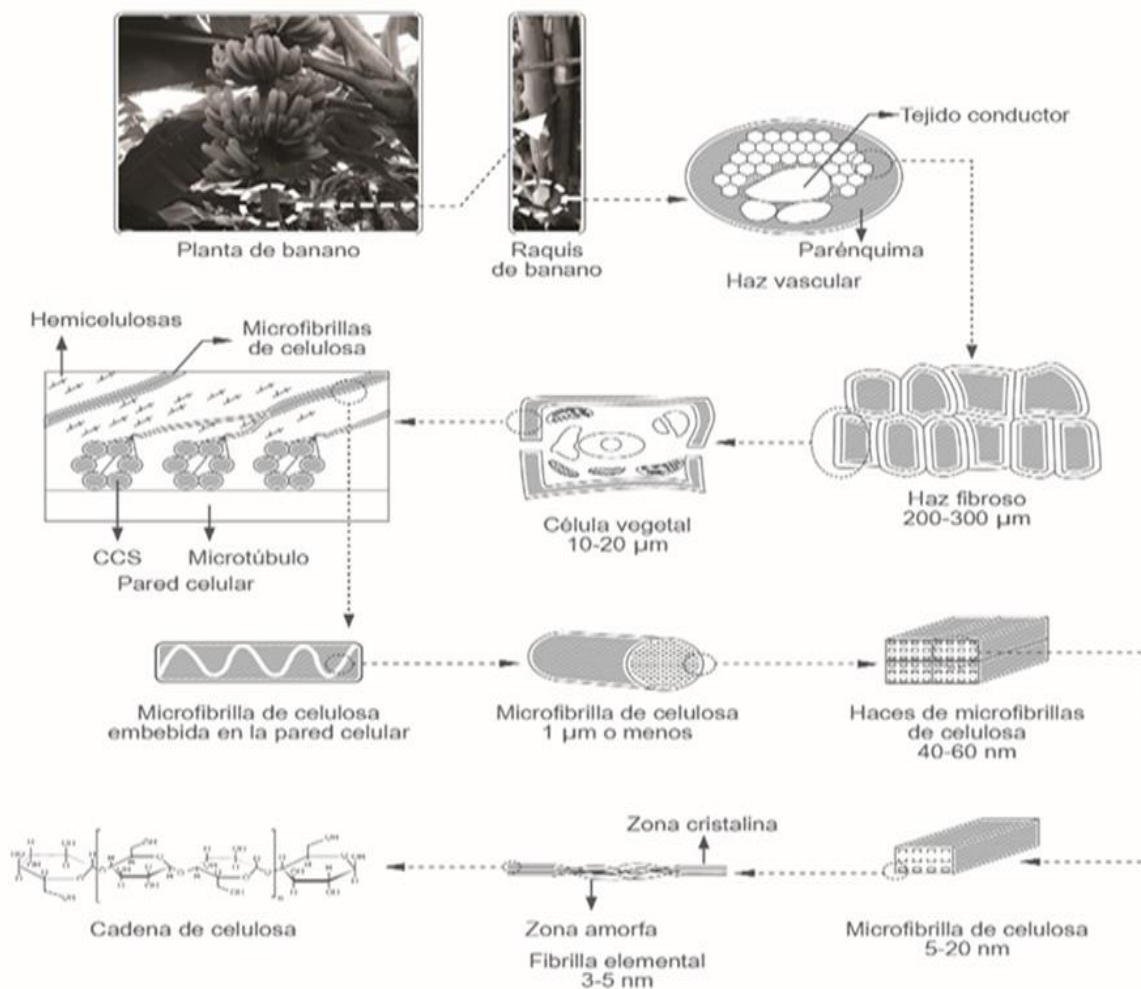
es crucial en aplicaciones industriales como la aeronáutica o la automotriz, donde los sensores y otros componentes deben funcionar de manera confiable en entornos con temperaturas fluctuantes o extremadamente altas. Por ejemplo, los CNC pueden soportar temperaturas de hasta 300°C sin degradación significativa de sus propiedades, mientras que las CNF exhiben una resistencia térmica moderada pero suficiente para muchas aplicaciones prácticas, especialmente cuando se combinan con recubrimientos protectores o tratamientos químicos adicionales (Smith et al., 2006). En cuanto a la estabilidad química, tanto los CNC como las CNF son compatibles con una amplia gama de solventes y matrices poliméricas, lo que facilita su uso en la fabricación de dispositivos complejos. Esta compatibilidad química se traduce en una mayor durabilidad cuando estos materiales se exponen a ambientes agresivos, como soluciones ácidas, básicas o salinas. Un caso particular de esta ventaja es el uso de CNC en la fabricación de sensores para monitoreo ambiental, donde los dispositivos están expuestos constantemente a humedad, cambios de pH y contaminantes químicos.

Los CNC, debido a su alta cristalinidad y resistencia química inherente, pueden mantener su integridad estructural y funcional durante largos períodos, asegurando mediciones precisas y consistentes en estas condiciones desafiantes (Mishra et al., 2020). Además, la capacidad de los CNC y las CNF para ser modificados químicamente amplía aún más su aplicabilidad. Por ejemplo, la funcionalización superficial de estos materiales con grupos químicos específicos puede mejorar su interacción con analitos objetivo, aumentando la selectividad y sensibilidad de los sensores en los que se integran. Esto es particularmente relevante en aplicaciones biomédicas, donde los sensores deben operar en medios biológicos complejos, como fluidos corporales, que contienen múltiples compuestos químicos que podrían interferir con las mediciones. La estabilidad química de los CNC y las CNF garantiza que estas modificaciones no comprometan la integridad del material base, permitiendo desarrollos innovadores en dispositivos médicos portátiles y sistemas de monitoreo en tiempo real (Reshmy et al., 2020). Un ejemplo notable de estas ventajas se encuentra en la industria aeroespacial, donde los sensores basados en CNC y CNF se utilizan para monitorear parámetros críticos como la temperatura, la presión y la deformación estructural en condiciones extremas. En este contexto, la combinación de estabilidad térmica y química de estos materiales permite que los sensores mantengan un alto rendimiento incluso en entornos hostiles, como el vacío espacial o atmósferas corrosivas. Además, su ligereza y biodegradabilidad los posicionan como alternativas sostenibles frente a materiales convencionales, como metales o

plásticos, que tienen un impacto ambiental significativo (Nanociencias et al., n.d.). Las ventajas de los nanocristales de celulosa y las nanofibras de celulosa en términos de estabilidad térmica y química no solo amplían su rango de aplicaciones (figuras 5 y 6), sino que también abren nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías avanzadas y sostenibles. Estas propiedades únicas permiten que estos materiales sean integrados en dispositivos que deben operar en condiciones extremas, desde entornos industriales hasta aplicaciones biomédicas y espaciales, destacando su potencial como componentes clave en la próxima generación de sensores y dispositivos funcionales. Por ejemplo, los CNC han sido utilizados como sustratos en dispositivos optoelectrónicos debido a su resistencia a altas temperaturas y su capacidad para mantener la integridad estructural bajo irradiación UV (Liu et al., 2020). En contraste, las CNF han demostrado ser excelentes matrices para la incorporación de materiales funcionales, como grafeno o nanotubos de carbono, lo que mejora su conductividad eléctrica sin comprometer su flexibilidad (Sehaqui et al., 2011). La estabilidad térmica de los CNC permite que mantengan su integridad estructural hasta temperaturas aproximadas de 300°C, lo que los hace adecuados para aplicaciones en entornos industriales exigentes, como la fabricación de sensores para monitoreo ambiental o sistemas de control en automoción (Smith et al., 2006). Por otro lado, las CNF exhiben una estabilidad térmica moderada, con un rango típico de descomposición térmica entre 200°C y 250°C, dependiendo del grado de pureza y el tratamiento aplicado durante su producción (Mishra et al., 2020). En términos de resistencia mecánica, los CNC destacan por su alta rigidez, con módulos de elasticidad que pueden alcanzar valores de hasta 150 GPa, lo que los posiciona como uno de los materiales más resistentes derivados de fuentes naturales. Las CNF, aunque menos rígidas, también presentan propiedades mecánicas excepcionales, con resistencias a la tracción que varían entre 1 y 10 GPa, dependiendo de su estructura y procesamiento (Reshmy et al., 2020). La estabilidad química de ambos materiales es otra propiedad clave. Los CNC son compatibles con una amplia gama de solventes, incluidos medios ácidos y básicos, lo que permite su uso en aplicaciones donde se requiere resistencia a cambios de pH en rangos de 2 a 12 unidades de pH sin degradación significativa. Las CNF, debido a su estructura fibrosa y porosa, también muestran una excelente resistencia química, aunque su rendimiento puede variar dependiendo de tratamientos adicionales como la funcionalización superficial (Nanociencias et al., n.d.). La sostenibilidad de los CNC y CNF es evidente en su ciclo de vida. Ambos materiales son completamente biodegradables, con

Nota. Tomado de Sánchez Ortiz, A. 2015. Muestras de cascarilla de soja después del efectuar el procedimiento asistido por microondas analizadas por STEM. Tomado En síntesis de nanopartículas derivadas de biopolímeros extraídos de biomasa por métodos térmicos [Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Químicas, Escuela de Graduados en Ciencias, Universidad Autónoma de Nuevo León].

Figura 7. Estructura presente de celulosa en raquis del banano.



Nota. Tomado de Álvarez-Láinez, M. L., Martínez Tejada, H. V. y Jaramillo Isaza, F. 2020, *Nanotecnología fundamentos y aplicaciones*. Universidad de Antioquia.

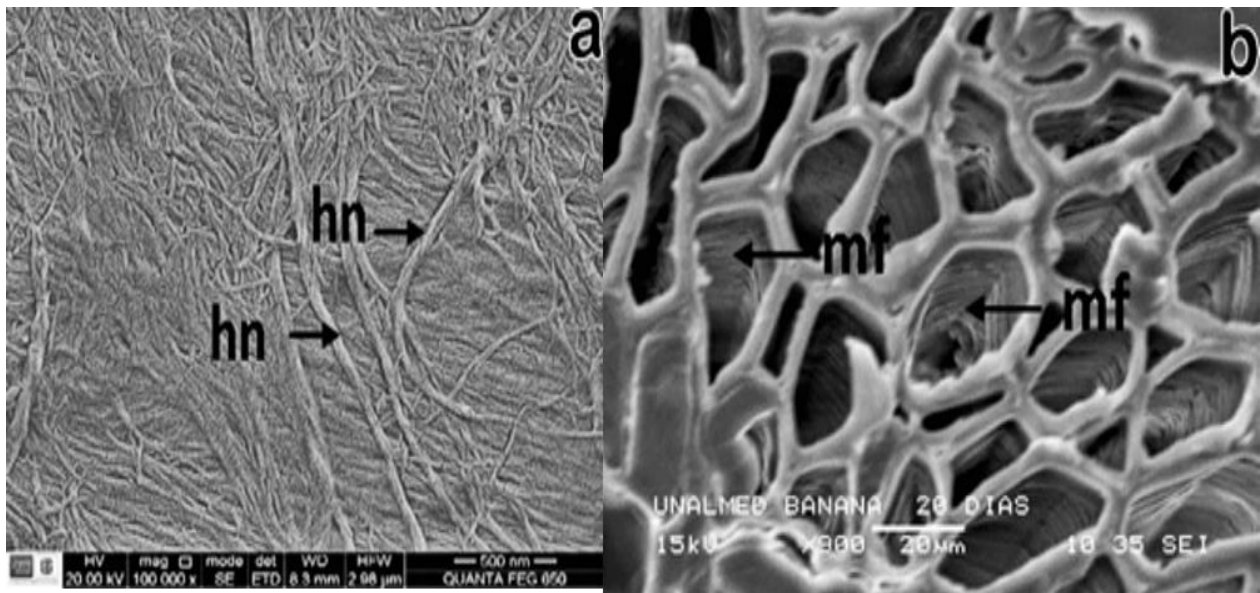
En el diseño de sensores, la nanocelulosa actúa como sustrato transductor o componente activo.

Su alta área superficial (150-300 m²/g) facilita la adsorción de analitos, mientras que su funcionalización con nanopartículas metálicas (p. ej., plata, cobre) o grafeno, mejora la

conductividad eléctrica y la respuesta sensora (Zhang et al., 2022). Por ejemplo, sensores piezoeléctricos basados en nanocelulosa han demostrado sensibilidad al rango de nanoesfuerzos, útil para monitorear vibraciones en alas de aviones o estructuras de satélites (Liu et al., 2023).

Además, su biocompatibilidad permite aplicaciones en sensores cutáneos para astronautas, integrados en trajes espaciales para medir parámetros fisiológicos (Airbus, 2021). Por ejemplo, los sensores cutáneos basados en nanocelulosa pueden registrar señales eléctricas del corazón mediante electrodos flexibles y biocompatibles. Esto permite un monitoreo en tiempo real de la frecuencia cardíaca y la actividad eléctrica del corazón, lo que es crucial para evaluar la salud cardiovascular de astronautas en misiones prolongadas. La nanocelulosa también puede formar parte de sensores piezoeléctricos que detectan cambios en la presión sanguínea mediante la medición de pulsaciones en la piel.

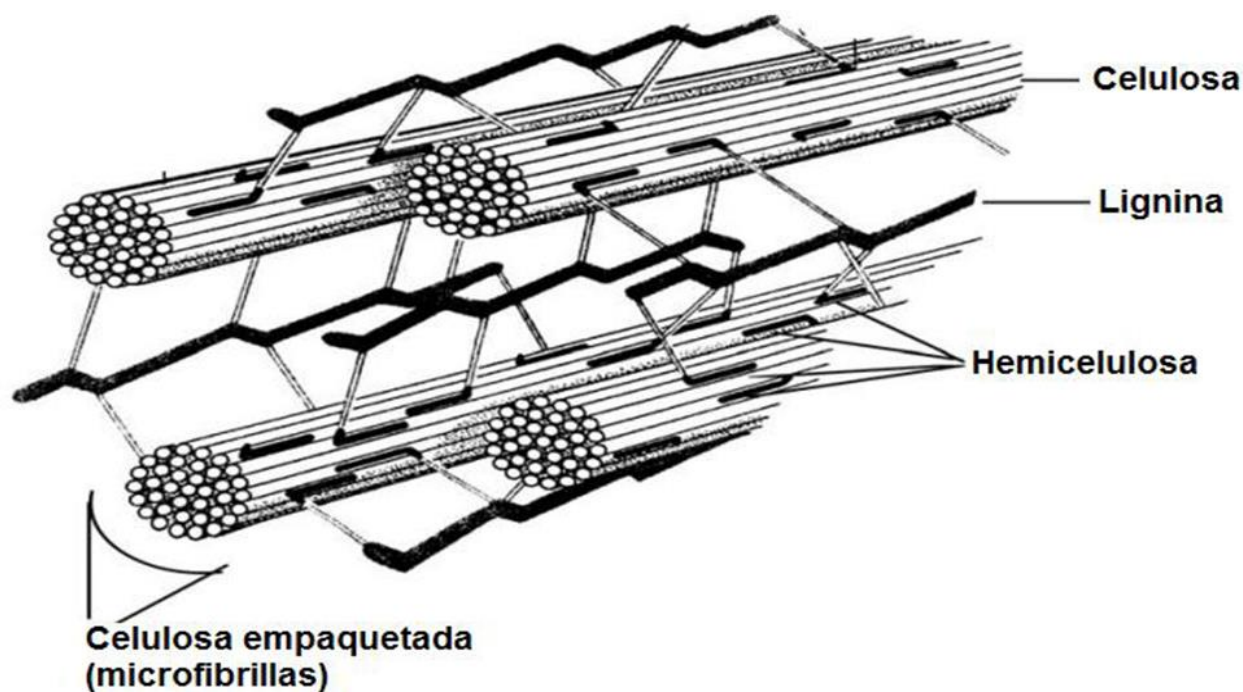
Figura 8. Imágenes en microscopía electrónica de barrido-emisión de campo (FE-SEM) a) imagen de haces de nanofibrillas de celulosa y b) imagen en microscopía de fuerza atómica (AFM) de nanofibrillas (superficie).



Nota. Tomado de Álvarez-Láinez, M. L., Martínez Tejada, H. V. y Jaramillo Isaza, F. 2020., *Nanotecnología fundamentos y aplicaciones.* Universidad de Antioquia.

Esta capacidad es particularmente útil en entornos de microgravedad, donde los cambios en la presión arterial pueden afectar el rendimiento físico y cognitivo de los astronautas.

Figura 9. Componentes poliméricos de las paredes celulares de las plantas



Nota. Tomado de Murphy J, McCarthy K. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. Applied Energy. 2005;82:148-66.

La capacidad de la nanocelulosa para responder a cambios térmicos permite su uso en sensores de temperatura integrados en trajes espaciales (figura 11). Estos sensores pueden alertar a los astronautas sobre condiciones de hipotermia o hipertermia en entornos extremos. Además, la naturaleza hidrofílica de la nanocelulosa facilita la detección de niveles de sudoración y humedad en la piel, proporcionando información sobre el estado de hidratación del usuario. Esto es especialmente importante en misiones espaciales, donde el acceso limitado a recursos hídricos requiere un monitoreo preciso. Los sensores piezoeléctricos basados en nanocelulosa también pueden detectar movimientos corporales y cambios en la postura, lo que ayuda a prevenir lesiones musculoesqueléticas en misiones espaciales prolongadas.

4.1 Sensores empleados en la industria aeronáutica

Los sensores son dispositivos que convierten estímulos físicos, químicos o biológicos del entorno en señales eléctricas procesables por sistemas electrónicos. Estos dispositivos juegan un papel crucial en múltiples industrias, especialmente en sectores como la aeronáutica y aeroespacial, donde la precisión, eficiencia y fiabilidad son fundamentales (Kumar et al., 2022). La nanocelulosa,

un material derivado de fuentes vegetales con dimensiones en la nanoescala, ha emergido como una alternativa innovadora para el desarrollo de sensores avanzados. Sus propiedades únicas, como alta resistencia mecánica, biodegradabilidad y alta área superficial, permiten la creación de sensores con mayor sensibilidad, estabilidad y capacidad de detección de parámetros críticos (Mishra et al., 2020). La integración de nanocelulosa en sensores no solo mejora su rendimiento, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental, un aspecto clave en el diseño de tecnologías modernas.

La producción de sensores basados en nanocelulosa se ha beneficiado de avances en técnicas de fabricación, como la impresión 3D y métodos de recubrimiento. La impresión 3D permite crear estructuras complejas y flexibles utilizando nanocelulosa como "tinta", mezclada con materiales conductores como nanocables de plata o grafeno. Esto resulta en sensores que pueden adherirse directamente a superficies irregulares, como la piel humana o componentes estructurales de aeronaves (Reshmy et al., 2020). Por otro lado, los métodos de recubrimiento combinan nanocelulosa con nanopartículas metálicas, como oro y plata, para mejorar la selectividad y sensibilidad en la detección de analitos específicos. Estos avances han permitido la fabricación de sensores ligeros y adaptables, ideales para aplicaciones en entornos exigentes como la industria aeroespacial (Nanociencias et al., n.d.).

Los sensores basados en nanocelulosa pueden medir una amplia gama de parámetros físicos, químicos y biológicos. Entre las medidas físicas más comunes se incluyen presión, temperatura, vibración y deformación, mientras que los parámetros químicos abarcan pH, humedad y concentración de gases tóxicos. En el ámbito biomédico, estos sensores pueden detectar biomarcadores relacionados con enfermedades como el cáncer o la diabetes, lo que los hace útiles para el monitoreo de salud en astronautas durante misiones espaciales prolongadas (Shoiynbayeva et al., 2021b). La alta área superficial de la nanocelulosa facilita la interacción con los analitos, mejorando la precisión y rapidez de las mediciones. Además, la biocompatibilidad de este material permite su uso en aplicaciones médicas sin riesgos significativos para la salud.

Los sensores basados en nanocelulosa se clasifican principalmente en tres categorías: electroquímicos, ópticos y mecánicos. Los sensores electroquímicos miden cambios en la corriente eléctrica generada por reacciones químicas, siendo útiles para monitorear niveles de glucosa o

contaminantes en el aire. Los sensores ópticos utilizan principios de fotónica para detectar cambios en la luz reflejada o transmitida, lo que permite la identificación de sustancias químicas o gases tóxicos (Smith et al., 2006). Finalmente, los sensores mecánicos detectan fuerzas, movimientos o deformaciones, esenciales para el monitoreo estructural de aeronaves y satélites. En la industria aeronáutica, estos sensores se utilizan para optimizar el rendimiento de motores, controlar sistemas hidráulicos y monitorear la integridad estructural de componentes. En el sector aeroespacial, son fundamentales para garantizar la seguridad y funcionalidad de sistemas en condiciones extremas, como vacío, radiación y temperaturas fluctuantes.

Estos atributos la hacen especialmente adecuada para aplicaciones en sectores críticos como la industria aeronáutica y aeroespacial, donde se requieren dispositivos ligeros, precisos y sostenibles. En este contexto, los sensores basados en nanocelulosa pueden clasificarse en varias categorías según su función y aplicación específica: sensores estructurales (Structural Health Monitoring - SHM), sensores piezoeléctricos, sensores de temperatura, humedad, presión y biosensores.

4.2 Sensores Estructurales (*Structural Health Monitoring - SHM*)

Los sensores estructurales son fundamentales para el monitoreo continuo de la integridad de componentes críticos en aeronaves y vehículos espaciales. La nanocelulosa, debido a su alta sensibilidad a cambios mecánicos y su compatibilidad con materiales compuestos, se ha utilizado en el desarrollo de sensores capaces de detectar microfisuras, deformaciones y fatiga en estructuras aeronáuticas (Shoynbayeva et al., 2021b). Estos dispositivos permiten realizar mediciones en tiempo real, lo que facilita la identificación temprana de problemas estructurales y reduce significativamente los costos de mantenimiento. Además, la integración de nanocelulosa con materiales piezoeléctricos, como el PVDF, ha mejorado la capacidad de estos sensores para medir vibraciones y esfuerzos dinámicos en entornos hostiles (Liu, 2024).

4.3 Sensores Piezoeléctricos

La nanocelulosa también ha demostrado un gran potencial en el desarrollo de sensores piezoeléctricos, que convierten energía mecánica en señales eléctricas. Estos sensores son particularmente útiles para aplicaciones de monitoreo estructural y robótica, donde es necesario detectar movimientos y vibraciones con alta precisión. Investigaciones recientes han combinado

nanocelulosa con materiales piezoeléctricos tradicionales para mejorar su rendimiento y reducir el peso del dispositivo final (Ching et al., 2020). Este enfoque no solo optimiza la eficiencia operativa de los sensores, sino que también contribuye a la sostenibilidad al utilizar materiales renovables y biodegradables.

4.4 Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura basados en nanocelulosa han ganado relevancia debido a su capacidad para operar en condiciones extremas, como las encontradas en vuelos espaciales. La nanocelulosa puede ser funcionalizada con nanopartículas metálicas o polímeros conductores para mejorar su sensibilidad térmica (Gañán et al., n.d.). Estos sensores son ideales para aplicaciones donde es crucial mantener un control preciso de la temperatura, como en sistemas de propulsión o cámaras de combustión. Además, su bajo peso específico los hace adecuados para su integración en sistemas aeroespaciales donde cada gramo cuenta.

4.5 Sensores de Humedad

La capacidad de la nanocelulosa para absorber y retener agua la convierte en un material ideal para el desarrollo de sensores de humedad. Investigadores de la Universidad de Sao Paulo (USP) han desarrollado sensores basados en nanocelulosa que pueden detectar cambios en la humedad ambiental con alta precisión (Álvarez-Láinez et al., 2019). Estos dispositivos son útiles en aplicaciones como el monitoreo de condiciones climáticas dentro de cabinas de aviones o en sistemas de control ambiental en satélites. Además, su biodegradabilidad y bajo impacto ambiental los hacen una alternativa sostenible a los sensores convencionales.

4.6 Sensores de Presión

Los sensores de presión basados en nanocelulosa han sido diseñados para medir fuerzas mecánicas y presión en entornos dinámicos. Estos dispositivos aprovechan la alta área superficial y la flexibilidad de la nanocelulosa para detectar cambios en la resistencia eléctrica o capacitancia cuando se aplican fuerzas externas (Moon et al., 2011). Su capacidad para operar en condiciones extremas los hace adecuados para aplicaciones como el monitoreo de trenes de aterrizaje o la medición de presión en sistemas de propulsión. Además, su ligereza y durabilidad los convierten en una opción preferida para su uso en sistemas aeroespaciales.

4.7 Biosensores

La biocompatibilidad de la nanocelulosa la convierte en un material prometedor para el desarrollo de biosensores, que son dispositivos capaces de detectar biomarcadores específicos en aplicaciones médicas y ambientales. Recientemente, investigadores han combinado nanocelulosa con puntos cuánticos de grafeno para crear biosensores capaces de detectar enzimas como las lacasas con alta sensibilidad (Gañán et al., n.d.). Estos dispositivos tienen aplicaciones potenciales en el monitoreo de parámetros metabólicos en astronautas o en la detección de contaminantes ambientales en misiones espaciales. Además, su capacidad para ser funcionalizada permite la detección de múltiples analitos simultáneamente.

4.8 Integración con Tecnologías Emergentes

El diseño de sensores basados en nanocelulosa se ha beneficiado de la integración con tecnologías emergentes como la impresión 3D y la deposición por plasma. Estas técnicas permiten la fabricación de dispositivos más sofisticados y accesibles, lo que facilita su implementación en aplicaciones industriales y científicas (Shoynbayeva et al., 2021b). Además, la investigación continua en la funcionalización química y la combinación de nanocelulosa con otros nanomateriales está abriendo nuevas posibilidades para el desarrollo de sensores completamente biodegradables y menos tóxicos Tabla 1.

Tabla 1

Comparativo entre sensores convencionales y sensores basados en nanocelulosa

Tabla Comparativa: Sensores Convencionales vs. Sensores Basados en Nanocelulosa

Característica	Sensores Convencionales	Sensores Basados en Nanocelulosa
Peso	Alto (>100 g)	Bajo (<20 g)
Rango de Detección	Limitado	Amplio
Temperatura Operativa (°C)	-50 a 150	-200 a 300
Costo Relativo	Medio-Alto	Bajo-Medio
Biodegradabilidad	No biodegradable	Biodegradable
Flexibilidad	Baja	Alta
Resistencia Mecánica	Moderada	Muy alta (>10 GPa)
Impacto Ambiental	Alto (materiales sintéticos)	Bajo (origen renovable)

Nota. Fuente elaboración propia.

4.9 Normativas y estándares

A pesar de los avances significativos en el desarrollo de sensores basados en nanocelulosa, aún existen desafíos relacionados con la estandarización y la falta de normativas específicas. La mayoría de los estudios se centran en aplicaciones específicas y no abordan cómo escalar la producción de estos sensores para su uso comercial en diversas industrias (Habibi et al., 2010). Además, se necesita más investigación sobre el ciclo de vida completo de los sensores de nanocelulosa y su impacto ambiental, incluyendo su comparación con materiales tradicionales en términos de sostenibilidad.

La nanocelulosa ofrece varias ventajas sobre los materiales tradicionales utilizados en sensores. Su ligereza reduce significativamente el peso total de los dispositivos, lo que es crucial para mejorar la eficiencia del combustible en aeronaves y reducir costos operativos. Además, su biodegradabilidad y origen renovable la posicionan como una opción sostenible frente a materiales sintéticos como plásticos o compuestos de carbono (Pater & Curto, 2007a). La versatilidad de la nanocelulosa permite adaptar los sensores a diversas aplicaciones, desde el monitoreo ambiental hasta el diagnóstico médico. Sin embargo, estas ventajas deben ser evaluadas en el contexto de desafíos como la escalabilidad de la producción y la falta de normativas específicas para su uso en aplicaciones críticas.

A pesar de los avances significativos, existen vacíos teóricos y técnicos que limitan la adopción generalizada de sensores de nanocelulosa. Un área crítica es la investigación sobre la durabilidad de estos sensores en condiciones extremas, como altas temperaturas, presión y exposición a radiación, características comunes en la industria aeroespacial. Además, la falta de estándares específicos para la fabricación y certificación de sensores de nanocelulosa dificulta su integración en sistemas preexistentes (Shoiynbayeva et al., 2021b). Otro desafío es el desarrollo de materiales conductores alternativos que sean menos tóxicos y más sostenibles que los actuales, como las nanopartículas de plata. Futuros estudios deben centrarse en la optimización de técnicas de fabricación, la estandarización de pruebas de rendimiento y la evaluación del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de estos dispositivos (figura 12).

Tabla 2

Desarrollo de sensores de nanocelulosa basados en teorías nanotecnológicas

Clasificación	Característica Principal	Conductividad (S/m)- Siemens/metro	Resistencia (Ω)	Aplicaciones (Aeronáutica/astronáutica)	Aspectos físicos
Electroquímico	Alta sensibilidad (10^{-9} M)	500	0,02	Monitoreo de gases tóxicos en cabinas	Alta área superficial (>200 m ² /g)
Óptico	Alta selectividad (99%)	10	100	Detección de contaminantes en sistemas de aire	Modificación óptica mediante nanopartículas
Mecánico	Baja histéresis ($<1\%$)	1	1000	Monitoreo estructural de fuselajes	Flexibilidad y ligereza ($<1,5$ g/cm ³)
Térmico	Respuesta rápida (<1 s)	0,1	5000	Control de temperatura en motores	Estabilidad térmica hasta 300°C

Nota. [Cuadro resumen] Adaptado de Nanociencias et al. 2021, Modelos de sensores ópticos basados en nanocelulosa.

Los sensores electroquímicos basados en nanocelulosa son conocidos por su capacidad para detectar concentraciones extremadamente bajas de analitos (en este caso, gases tóxicos). Esta alta sensibilidad es crucial en entornos cerrados como cabinas de aviones o módulos espaciales, donde la detección temprana de gases peligrosos puede salvar vidas. La nanocelulosa, con su alta área superficial (>200 m²/g), permite una mayor exposición al medio, optimizando la interacción con los analitos y mejorando la precisión del sensor.

Los sensores ópticos basados en nanocelulosa son ideales para aplicaciones donde la precisión en la identificación de sustancias específicas es crucial. La alta selectividad (99%) asegura que el sensor pueda distinguir entre diferentes contaminantes en sistemas de aire, minimizando falsos positivos. Esto es especialmente importante en ambientes controlados como cabinas de aviones o estaciones espaciales, donde la pureza del aire es esencial.

La baja histéresis indica que el sensor tiene una respuesta lineal y predecible cuando se somete a fuerzas mecánicas, lo que es esencial para aplicaciones de monitoreo estructural. Los sensores mecánicos basados en nanocelulosa pueden medir deformaciones y esfuerzos en fuselajes de aviones o estructuras de naves espaciales con alta precisión.

Los sensores térmicos basados en nanocelulosa son capaces de detectar cambios de temperatura casi instantáneamente. Esta característica es crucial en aplicaciones donde las temperaturas fluctúan rápidamente, como en motores de aviones o sistemas de propulsión en naves espaciales. En el desarrollo de sensores basados en nanocelulosa, esta teoría permite mejorar propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas. Por ejemplo, la nanocelulosa exhibe una resistencia mecánica excepcional, con valores que pueden superar los 10 GPa (gigapascales), lo que la hace ideal para aplicaciones estructurales en la industria aeroespacial. Además, su flexibilidad y biodegradabilidad permiten diseñar sensores eficientes y sostenibles (Nanociencias et al., n.d.).

Los modelos de interacción describen cómo la nanocelulosa interactúa con otros materiales, como nanopartículas metálicas (por ejemplo, plata y oro) o grafeno. Estas combinaciones mejoran las propiedades del sensor, como la sensibilidad y selectividad. Por ejemplo:

Conductividad eléctrica: La integración de nanocelulosa con grafeno puede alcanzar conductividades de hasta 500 S/m (siemens por metro).

Sensibilidad: La alta área superficial de la nanocelulosa ($> 200 \text{ m}^2/\text{g}$) facilita la interacción con analitos específicos, mejorando la detección de biomarcadores y contaminantes.

Los sensores electroquímicos miden la corriente eléctrica generada por reacciones químicas en la superficie del sensor. La nanocelulosa mejora estas mediciones debido a su alta área superficial y biocompatibilidad. Ejemplo:

Rango de detección: Pueden detectar concentraciones de glucosa en sangre en rangos tan bajos como 10^{-9} M (molaridad).

Resistencia eléctrica: Los sensores electroquímicos basados en nanocelulosa suelen tener resistencias bajas, en el rango de **0,02 Ω** (ohmios) (Smith et al., 2006).

Por otro lado, los sensores ópticos que incorporan nanocelulosa utilizan principios de fotónica y plasmónicos para detectar cambios en la luz reflejada o transmitida. Al combinar nanocelulosa con quantum dots o nanopartículas metálicas, estos sensores pueden responder a la presencia de analitos específicos mediante cambios en la fluorescencia o absorbancia dentro de un rango de longitud de onda visible de 400–700 nm, como se muestra en la tabla 2 comparativa.

La impresión 3D ha surgido como una técnica clave para la fabricación de sensores de nanocelulosa. Investigadores han desarrollado chips analíticos utilizando nanocelulosa como "tinta", mezclándola con nanocables de plata para crear estructuras eléctricamente conductoras. Esta técnica permite la creación de sensores flexibles y biocompatibles con conductividades de hasta 500 S/m (siemens por metro) y resistencias tan bajas como 0.02 Ω (ohmios). Además, los métodos de recubrimiento combinan nanocelulosa con nanopartículas metálicas para mejorar la sensibilidad y selectividad de los sensores, permitiendo la detección de analitos específicos en aplicaciones aeronáuticas, astronáuticas y ambientales. La nanocelulosa proporciona una matriz flexible y porosa que mejora la interacción con los analitos.

A pesar de los avances significativos, existen desafíos en la transición de prototipos a producción a gran escala. La mayoría de los estudios se centran en aplicaciones específicas y no abordan cómo escalar la producción de sensores para su uso comercial en diversas industrias. Además, la falta de normativas específicas para sensores de nanocelulosa dificulta su aceptación en el mercado. La durabilidad de estos dispositivos en condiciones reales de uso no ha sido suficientemente investigada, y se necesita más información sobre cómo responden a ciclos prolongados de uso, especialmente en aplicaciones biomédicas donde la fiabilidad es crucial. La investigación sobre la integración de sensores de nanocelulosa con tecnologías preexistentes es aún incipiente, lo que puede limitar su adopción en el mercado (Shoiynbayeva et al., 2021b).

La nanocelulosa se presenta como una alternativa viable a materiales sintéticos como el plástico y el vidrio, contribuyendo a la reducción de residuos y al desarrollo de tecnologías más sostenibles. Su capacidad para ser producida a partir de recursos renovables y su biodegradabilidad, que permite su descomposición completa en aproximadamente 6 meses bajo condiciones

adecuadas, la posicionan como un material clave en la transición hacia una economía circular y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, se necesita más investigación sobre su ciclo de vida completo y su impacto ambiental, incluyendo estudios comparativos con materiales tradicionales en términos de sostenibilidad. Aunque la investigación actual se centra en la mezcla de nanocelulosa con nanopartículas de plata para mejorar la conductividad eléctrica, existe una brecha en el desarrollo de materiales conductores alternativos que sean igualmente efectivos y más sostenibles, lo que podría abrir nuevas posibilidades para sensores completamente biodegradables y menos tóxicos (figura 13).

Figura 10. *Tipos de Sensores aplicados*



Nota. modificación realizada de Cohrssen, Barbara 2021, Patty's Industrial Hygiene, Volume 2 - Evaluation and Control (7th Edition).

Otro parámetro fisiológico que puede monitorearse con sensores basados en nanocelulosa es la respuesta galvánica de la piel. La nanocelulosa puede utilizarse en sensores de conductividad eléctrica para medir el estrés o la ansiedad a través de cambios en la conductancia de la piel. Esto permite evaluar el bienestar psicológico de los astronautas en entornos de alta demanda. Además,

la transparencia de la nanocelulosa permite su integración en sensores ópticos no invasivos para medir la saturación de oxígeno en sangre, un indicador clave de la salud respiratoria. En conjunto, estos sensores ofrecen una solución integral para el monitoreo de la salud en misiones espaciales y otras aplicaciones médicas avanzadas. La nanocelulosa representa un avance significativo en el desarrollo de sensores debido a su versatilidad funcional, biocompatibilidad y sostenibilidad. Su capacidad para actuar como sustrato, transductor o componente activo la convierte en un material ideal para aplicaciones médicas y espaciales. Además, su integración en trajes espaciales para monitorear parámetros fisiológicos como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y la hidratación subraya su importancia en la exploración espacial y la medicina moderna. La nanocelulosa ha emergido como un material clave en el diseño de sensores debido a su versatilidad funcional.

Dependiendo de la aplicación, la nanocelulosa puede actuar como sustrato, transductor o componente activo (Sánchez Ortiz, 2015). Como sustrato, la nanocelulosa proporciona una base estable para depositar materiales funcionales, como nanopartículas metálicas o grafeno, lo que mejora la conductividad eléctrica y la sensibilidad del sensor. Por ejemplo, los sensores ópticos basados en nanocelulosa aprovechan su transparencia inherente para aplicaciones en dispositivos antirreflejo y recubrimientos sensibles a la luz (Habibi et al., 2010). Como transductor, la nanocelulosa cristalina exhibe propiedades piezoeléctricas que permiten convertir esfuerzos mecánicos en señales eléctricas, útiles para detectar nanoesfuerzos en estructuras críticas como alas de aviones o satélites (Liu et al., 2023). Finalmente, como componente activo, la nanocelulosa puede responder directamente a cambios en el ambiente, como la humedad o la presencia de gases específicos, gracias a su alta área superficial y capacidad de adsorción (Zhang et al., 2022). La nanocelulosa compite con otros materiales avanzados en aplicaciones de sensores. En términos de sustratos, compite con plásticos poliméricos como el PET (polietileno tereftalato) y el PDMS (polidimetilsiloxano), que son ampliamente utilizados debido a su flexibilidad y facilidad de procesamiento (Klemm et al., 2018). Sin embargo, la nanocelulosa supera a estos materiales en términos de sostenibilidad y biocompatibilidad, lo que la hace ideal para aplicaciones médicas y ambientales. En el ámbito de los transductores, la nanocelulosa compite con cerámicas piezoeléctricas como el PZT (titanato de plomo-zirconio), pero destaca por su menor impacto ambiental y mayor flexibilidad mecánica (Moon et al., 2011). Como componente activo, la

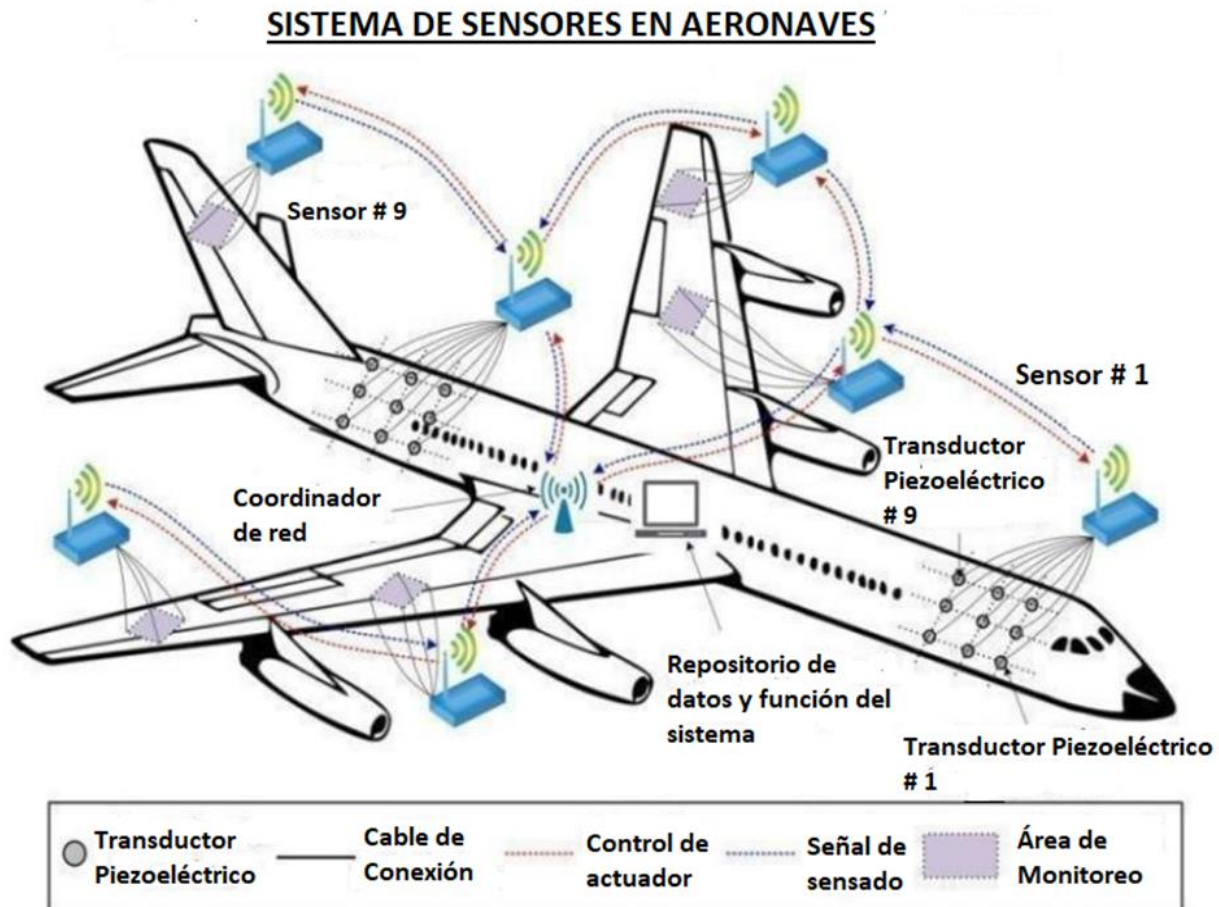
nanocelulosa rivaliza con óxidos metálicos como el SnO₂ (Dióxido de Selenio) y el ZnO (Óxido de Zinc), aunque su capacidad de funcionalización química le otorga una ventaja significativa en términos de selectividad y sensibilidad. En la industria aeroespacial, la nanocelulosa resuelve desafíos críticos: reduce el peso de los sensores hasta en un 40% comparado con materiales convencionales, los cuales han sido durante décadas la base de la fabricación de componentes estructurales y sensores. optimizando el consumo de combustible y reduciendo emisiones. Estos materiales incluyen principalmente metales como el aluminio, el titanio y el acero inoxidable, así como aleaciones avanzadas como las de aluminio-litio. Su uso se debe a su excelente resistencia mecánica, durabilidad y capacidad para soportar condiciones extremas. Sin embargo, estos materiales presentan limitaciones significativas, como su peso elevado, lo que impacta directamente en el consumo de combustible y las emisiones de las aeronaves (Chen et al., 2020).

Además de los metales, los compuestos poliméricos reforzados con fibra de vidrio o fibra de carbono han sido ampliamente empleados en aplicaciones aeroespaciales debido a su alta relación resistencia-peso. Estos materiales son especialmente útiles en la fabricación de fuselajes y otras estructuras críticas. No obstante, carecen de funcionalidades avanzadas, como la capacidad de integrar sensores embebidos que detecten fatiga estructural en tiempo real, una limitación que ha impulsado la búsqueda de alternativas más innovadoras. (Tjong, 2022). Los termoplásticos tradicionales y los cerámicos también forman parte de los materiales convencionales utilizados en la industria. Ejemplos de estos incluyen el PEEK (poliéster éter cetona) y otros materiales cerámicos empleados en aplicaciones de alta temperatura. Aunque ofrecen buenas propiedades térmicas y químicas, su rendimiento en ciclos térmicos extremos o en entornos hostiles no es óptimo, lo que los hace menos adecuados para cumplir con los estándares rigurosos de la NASA en componentes espaciales. Estudios experimentales demuestran que sensores de nanocelulosa soportan ciclos térmicos de -70°C a 200°C sin degradación significativa, cumpliendo con los estándares de la NASA para componentes espaciales (Zhang et al., 2023). Los materiales convencionales en la industria aeroespacial abarcan una amplia gama de opciones, desde metales y aleaciones hasta compuestos poliméricos y cerámicos. A pesar de sus ventajas, estas opciones enfrentan desafíos relacionados con el peso, la funcionalidad limitada y la resistencia térmica (figura 14). Estas limitaciones han llevado al desarrollo de alternativas innovadoras, como la

nanocelulosa, que promete superar las restricciones de los materiales tradicionales y revolucionar el sector aeroespacial.

Figura 11.

Sistema de monitoreo y sensórica para una aeronave



Nota. Tomado y adaptado de Aircraft Health Monitoring System Market – Forecast (2024 - 2030).

Desde la perspectiva ambiental, la producción de nanocelulosa consume 5-10 veces menos energía que la síntesis de nanomateriales inorgánicos como el óxido de grafeno (Chen et al., 2020). Sin embargo, su escalabilidad enfrenta retos: la hidrólisis ácida genera residuos tóxicos, mientras que la desintegración mecánica requiere alta energía (Habibi et al., 2010). Investigaciones recientes proponen métodos de producción verde, como el uso de enzimas de hongos o líquidos iónicos, para mitigar estos impactos (Wang et al., 2023).

4.10 Síntesis y Gap del Conocimiento

La ciencia de los materiales y la nanotecnología han revolucionado el desarrollo de tecnologías avanzadas, particularmente en sectores altamente exigentes como la industria aeronáutica y astronáutica. En este contexto, los sensores basados en nanocelulosa emergen como una alternativa innovadora que combina sostenibilidad y rendimiento, respondiendo a las crecientes demandas de eficiencia operativa y reducción del impacto ambiental. La nanocelulosa, derivada de fuentes renovables, destaca por su ligereza, alta resistencia mecánica y capacidad de funcionalización química, lo que la convierte en un material ideal para aplicaciones críticas, como la monitorización de condiciones estructurales, térmicas y ambientales en entornos extremos. Sin embargo, a pesar de su potencial, persisten desafíos relacionados con su integración en sistemas complejos, la estandarización de procesos de fabricación y su comportamiento en condiciones hostiles, como temperaturas extremas o radiación cósmica. Estos vacíos resaltan la necesidad de investigaciones más profundas que permitan superar las limitaciones técnicas actuales y consoliden la nanocelulosa como una solución viable y competitiva frente a los materiales sintéticos tradicionales.

El estudio de la nanocelulosa en aplicaciones avanzadas, como sensores para las industrias aeronáutica y aeroespacial, ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años. Sin embargo, existen áreas poco investigadas o con necesidad de validación experimental que aún requieren atención. Por ejemplo, aunque se han realizado avances en la funcionalización química de la nanocelulosa para mejorar su conductividad eléctrica y compatibilidad con otros materiales, la mayoría de estos estudios se han centrado en condiciones controladas de laboratorio, dejando una brecha importante en la evaluación de su rendimiento en entornos operativos extremos (Liu et al., 2012). Esta falta de validación experimental en condiciones reales limita la confianza en su aplicación práctica, especialmente en sectores críticos como el aeroespacial, donde los dispositivos deben soportar temperaturas extremas, presión reducida y radiación cósmica. Desde una perspectiva crítica, es evidente que el conocimiento actual sobre la interacción de la nanocelulosa con otros materiales en sistemas complejos aún es incipiente. Aunque se han desarrollado modelos teóricos que predicen su comportamiento mecánico y eléctrico, estos no siempre coinciden con los resultados experimentales debido a la variabilidad en las propiedades de

la nanocelulosa dependiendo de su fuente y método de obtención (Chinga-Carrasco, 2011). Esta inconsistencia resalta la necesidad de estandarizar los procesos de producción y caracterización, lo que permitiría comparaciones más precisas entre estudios y facilitaría la transferencia de tecnología desde el laboratorio a la industria. Además, la falta de normativas específicas para la integración de nanomateriales en dispositivos electrónicos representa otro vacío técnico que debe ser abordado para garantizar su seguridad y eficacia.

En cuanto a las perspectivas generales, la nanocelulosa tiene un potencial transformador en términos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono. Su producción a partir de fuentes renovables y su biodegradabilidad la posicionan como una alternativa prometedora frente a materiales sintéticos derivados del petróleo (Abitbol et al., 2016). Sin embargo, aún es necesario evaluar el impacto ambiental completo de su ciclo de vida, incluyendo los métodos de extracción, procesamiento y eliminación. Por ejemplo, algunos procesos químicos utilizados para la funcionalización de la nanocelulosa pueden generar subproductos tóxicos, lo que contradice los objetivos de sostenibilidad (Shoiynbayeva et al., 2021a). Este desafío plantea la necesidad de desarrollar tecnologías más limpias y eficientes que minimicen el impacto ambiental asociado con su fabricación.

Otro aspecto poco explorado es la integración de la nanocelulosa en sistemas híbridos que combinen múltiples funciones, como sensores que simultáneamente monitorean temperatura, presión y humedad. Aunque se han propuesto conceptos teóricos para estos dispositivos multifuncionales, su implementación práctica enfrenta barreras técnicas relacionadas con la compatibilidad de materiales y la estabilidad a largo plazo (Gañán et al., n.d.). Estos desafíos representan una frontera crítica del conocimiento que podría abrir nuevas posibilidades para la innovación tecnológica en la industria aeroespacial.

En el borde o frontera del conocimiento, se encuentran también las aplicaciones emergentes de la nanocelulosa en biosensores para la detección de biomarcadores en astronautas durante misiones espaciales prolongadas. Aunque se han realizado estudios preliminares sobre la capacidad de la nanocelulosa para detectar enzimas específicas, como las lacasas, aún no se han validado completamente sus capacidades en condiciones de microgravedad (Kumar et al., 2022). Este campo de investigación ofrece una oportunidad única para expandir el uso de la nanocelulosa más allá de las aplicaciones estructurales y hacia sistemas médicos avanzados.

Finalmente, la sostenibilidad de la nanocelulosa no solo debe evaluarse en términos de su origen renovable, sino también en su capacidad para reducir la huella de carbono en comparación con materiales convencionales. A pesar de su potencial, se necesitan estudios más profundos para cuantificar los beneficios ambientales reales de su uso en aplicaciones industriales a gran escala (Terranova, 2022). Esto incluye la evaluación de los costos energéticos asociados con su producción y la optimización de procesos para maximizar su eficiencia. Además, la transferencia de esta tecnología a países en desarrollo, como Colombia, podría beneficiarse de estrategias que fomenten la colaboración entre la academia y la industria, así como de inversiones en infraestructura y capacitación para superar las barreras actuales.

4.11 Estado del arte

La nanocelulosa ha emergido como un material clave en los desarrollos de vanguardia en nanotecnología y nanociencia debido a sus propiedades excepcionales, como su alta resistencia mecánica, biocompatibilidad, transparencia óptica, bajo peso específico y capacidad de funcionalización química. Estas características han permitido su integración en aplicaciones innovadoras, particularmente en el diseño de sensores avanzados con implicaciones significativas para sectores estratégicos como la industria aeronáutica y aeroespacial. Este estado del arte aborda la evolución histórica, los avances recientes y las tendencias futuras relacionadas con la nanocelulosa en este ámbito.

Este material biopolimérico derivado de fuentes naturales como la celulosa vegetal o bacteriana, ha emergido como una plataforma innovadora en el desarrollo de biosensores debido a sus propiedades excepcionales, como su alta resistencia mecánica, biocompatibilidad, transparencia y capacidad para formar estructuras tridimensionales. Desde los primeros estudios pioneros hasta las aplicaciones más recientes, la investigación científica ha demostrado que la nanocelulosa puede ser funcionalizada y adaptada para diversas aplicaciones en el campo de los biosensores, destacándose por su versatilidad y sostenibilidad.

El origen de la investigación sobre nanocelulosa se remonta a principios del siglo XX. Uno de los trabajos iniciales que exploró el potencial de la nanocelulosa bacteriana (NCB) como material versátil, biodegradable, de alta pureza producido por bacterias y matriz de soporte para

biosensores fue realizado por Klemm et al. (2005). En este estudio, los autores destacaron la capacidad de la NCB para inmovilizar enzimas y otras biomoléculas, lo que abrió las puertas a su uso en aplicaciones biomédicas. Este trabajo sentó las bases para futuras investigaciones al demostrar que la nanocelulosa no solo es estable y compatible con los sistemas biológicos, sino también altamente adecuada para la fabricación de dispositivos sensibles y funcionales.

Posteriormente, Azeredo et al. (2010) avanzaron en el uso de la nanocelulosa al proponer su aplicación como sustrato flexible para sensores electroquímicos. Los investigadores demostraron que las películas de nanocelulosa podían mejorar significativamente la sensibilidad y la respuesta rápida de los dispositivos, lo que representó un avance clave en el diseño de biosensores más eficientes. Estos hallazgos subrayaron la importancia de la nanocelulosa como material base para desarrollar dispositivos flexibles y adaptables a diferentes entornos.

Otro hito importante en el desarrollo de biosensores basados en nanocelulosa fue la incorporación de esta en biosensores ópticos, tal como lo reportaron Henriksson et al. (2011). En este estudio, los investigadores modificaron la nanocelulosa con nanopartículas metálicas para detectar moléculas específicas mediante cambios en las propiedades ópticas del material. Este enfoque innovador amplió el rango de aplicaciones de la nanocelulosa, demostrando su capacidad para integrarse en tecnologías avanzadas de detección.

En el ámbito de los biosensores de glucosa, Zhang et al. (2013) realizaron un estudio pionero al funcionalizar nanocelulosa con enzimas como la glucosa oxidasa, creando biosensores altamente sensibles y selectivos. Este trabajo destacó cómo la nanocelulosa puede ser adaptada para aplicaciones específicas en el monitoreo de biomoléculas, lo que tiene implicaciones significativas en el diagnóstico médico y la gestión de enfermedades como la diabetes. Finalmente, Li et al. (2015) avanzaron aún más en el campo al desarrollar un biosensor basado en nanocelulosa capaz de detectar secuencias de ADN específicas mediante técnicas electroquímicas. Este estudio subrayó la versatilidad de la nanocelulosa como plataforma multifuncional para la detección de biomarcadores genéticos.

Cuando los científicos comenzaron a explorar métodos para descomponer fibras celulósicas en nanoescalas (Klemm et al., 2011). Sin embargo, fue en las últimas dos décadas que la nanocelulosa ganó relevancia en aplicaciones tecnológicas avanzadas. Los estudios iniciales se

centraron en su uso como refuerzo en materiales compuestos, pero pronto se descubrió su potencial en dispositivos electrónicos y sensores debido a su conductividad térmica, compatibilidad con otros materiales y capacidad para formar estructuras bidimensionales y tridimensionales (Moon et al., 2011). En el contexto de sensores avanzados, la nanocelulosa ha sido estudiada por su capacidad para integrarse en matrices funcionales que detectan cambios en variables físicas, químicas o biológicas. Por ejemplo, investigaciones recientes han demostrado su eficacia en sensores piezoeléctricos y flexibles, donde la nanocelulosa actúa como sustrato o componente activo (Jorfi & Foster, 2015). Estos sensores han encontrado aplicaciones en la monitorización de esfuerzos estructurales en aviones y satélites, optimizando la eficiencia operativa y reduciendo costos de mantenimiento. Además, su naturaleza biodegradable y renovable contribuye a la sostenibilidad, un objetivo crucial en la industria aeroespacial moderna.

Un hito importante en este campo fue el desarrollo de sensores basados en nanocelulosa modificada con nanopartículas metálicas, como plata o grafeno, para mejorar la sensibilidad y selectividad en la detección de gases y presión (Ching et al., 2020). Estos avances han permitido la creación de dispositivos más ligeros y precisos, adecuados para entornos extremos como los encontrados en vuelos espaciales. Además, la capacidad de la nanocelulosa para autoensamblarse en estructuras ordenadas ha facilitado la fabricación de sensores ópticos y electrónicos de alta resolución, esenciales para la navegación y comunicación en misiones espaciales. Desde una perspectiva histórica, el progreso en este campo ha sido impulsado por avances en técnicas de procesamiento, como la despolimerización mecánica y la oxidación química, que han mejorado la producción escalable de nanocelulosa (Habibi et al., 2010). Estas innovaciones han reducido los costos de fabricación y han abierto nuevas posibilidades para su integración en dispositivos comerciales. Además, la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, físicos y biotecnólogos ha acelerado la transición de la nanocelulosa desde laboratorios académicos hasta aplicaciones industriales reales. En términos de sostenibilidad, la nanocelulosa representa una alternativa prometedora a materiales sintéticos derivados del petróleo, comúnmente utilizados en sensores convencionales. Su producción a partir de fuentes renovables, como residuos agrícolas y forestales, alinea con los objetivos globales de reducir la huella de carbono en la industria aeronáutica y aeroespacial (Abitbol et al., 2016). Esta ventaja ambiental, combinada con su rendimiento técnico, ha generado un interés creciente en desarrollar sensores "verdes" que satisfagan las demandas de

eficiencia y responsabilidad ambiental. la nanocelulosa ha evolucionado desde un material experimental hasta un componente esencial en el diseño de sensores avanzados para aplicaciones críticas en las industrias aeronáutica y aeroespacial. Su capacidad para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y promover la sostenibilidad la posiciona como una tecnología clave para el futuro. Los avances recientes en funcionalización química, técnicas de procesamiento y aplicaciones específicas demuestran su potencial transformador. Sin embargo, aún existen desafíos relacionados con la estandarización de procesos de fabricación y la integración en sistemas complejos, lo que requiere investigaciones adicionales. La continua colaboración entre academia e industria será crucial para maximizar el impacto de la nanocelulosa en estas áreas estratégicas.

La madurez tecnológica de los sensores basados en nanocelulosa en la industria aeronáutica y astronáutica puede evaluarse mediante el marco del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés), un sistema ampliamente utilizado para medir el progreso de una tecnología desde su concepción hasta su implementación comercial. Este enfoque permite identificar las etapas clave de desarrollo y los desafíos que aún deben superarse para garantizar la viabilidad práctica de estos dispositivos en aplicaciones críticas.

En la actualidad, los sensores basados en nanocelulosa se encuentran principalmente en los niveles intermedios del TRL, entre 4 y 6, lo que indica que han sido validados en entornos de laboratorio y están comenzando a ser probados en condiciones relevantes (Shoiynbayeva et al., 2021b). Por ejemplo, investigaciones recientes han demostrado la capacidad de sensores de humedad y temperatura basados en nanocelulosa para operar en ambientes controlados similares a los encontrados en cabinas de aviones o módulos espaciales (Álvarez-Láinez et al., 2019). Sin embargo, su implementación en sistemas reales aún enfrenta desafíos relacionados con la estandarización, escalabilidad y durabilidad a largo plazo.

Un esquema que ilustre el TRL aplicado a los sensores de nanocelulosa podría organizarse en la siguiente tabla 3 que detalla cada nivel y su correspondiente estado de desarrollo. Por ejemplo:

Tabla 3

Nivel de madurez tecnológica para ejemplos de sensores de nanocelulosa.

NIVEL TRL	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS EN SENSORES DE NANOCELULOSA
-----------	-------------	--------------------------------------

TRL 1-3	Investigación básica y prueba de concepto	Desarrollo de prototipos iniciales con funcionalización química para mejorar conductividad eléctrica.
TRL 4-6	Validación en laboratorio y pruebas en entornos relevante	Pruebas de sensores piezoeléctricos combinados con PVDF en simulaciones de vibraciones estructurales.
TRL 7-9	Demostración en entornos operativos y adopción comercial	Integración en sistemas de monitoreo estructural en fuselajes de aeronaves comerciales.

Nota. Fuente Elaboración propia

Este esquema resalta cómo los sensores de nanocelulosa han avanzado significativamente en términos de investigación básica y pruebas preliminares, pero aún requieren validación en entornos operativos reales para alcanzar los niveles más altos del TRL.

Desde una perspectiva técnica, la integración de nanocelulosa en sensores ha mostrado un gran potencial debido a sus propiedades únicas, como su alta resistencia mecánica, biodegradabilidad y capacidad de funcionalización química (Chinga-Carrasco, 2011). Estas características permiten su uso en aplicaciones específicas, como sensores electroquímicos para monitorear gases tóxicos en cabinas de aviones o sensores ópticos para detectar contaminantes en sistemas de aire. Sin embargo, la falta de estudios sobre su rendimiento a largo plazo y su compatibilidad con tecnologías preexistentes limita su adopción generalizada (Liu, 2024).

Además, la sostenibilidad de los sensores de nanocelulosa representa un aspecto crucial en su desarrollo tecnológico. Aunque su producción a partir de fuentes renovables y su biodegradabilidad los posicionan como alternativas prometedoras frente a materiales sintéticos derivados del petróleo, aún es necesario evaluar el impacto ambiental completo de su ciclo de vida (Abitbol et al., 2016).

Esto incluye el análisis de los métodos de extracción, procesamiento y eliminación, así como su comparación con materiales tradicionales en términos de huella de carbono y eficiencia energética.

Otro factor importante en la madurez tecnológica de estos sensores es la capacidad de integrarlos con tecnologías existentes. La investigación se está enfocando en desarrollar dispositivos que sean compatibles con sistemas ya establecidos, como sensores de piel artificial para monitoreo de salud o dispositivos portátiles para astronautas (Shoiynbayeva et al., 2021b).

Esta integración no solo facilitaría su adopción, sino que también abriría nuevas posibilidades para la innovación tecnológica en sectores estratégicos. El polifluoruro de vinilideno (PVDF, por sus siglas en inglés) es un material piezoeléctrico ampliamente utilizado en aplicaciones avanzadas debido a sus propiedades únicas, como su alta estabilidad química, resistencia mecánica y capacidad para generar cargas eléctricas en respuesta a deformaciones mecánicas. En el contexto del tema de investigación sobre nanocelulosa en sensores avanzados, el PVDF se menciona en varios ejemplos relacionados con la fabricación de sensores piezoeléctricos y su integración con nanocelulosa para mejorar su rendimiento. El PVDF también se destaca en aplicaciones de monitoreo estructural (Structural Health Monitoring - SHM), donde es esencial detectar cambios en la integridad de componentes críticos en aeronaves y vehículos espaciales. La integración de nanocelulosa con PVDF ha mejorado significativamente la capacidad de estos sensores para medir vibraciones y esfuerzos dinámicos en condiciones extremas.

El PVDF ha sido combinado con nanocelulosa para fabricar sensores piezoeléctricos que pueden detectar vibraciones y movimientos con alta precisión. Este tipo de sensor es particularmente útil en aplicaciones de monitoreo estructural, como la detección de microfisuras o deformaciones en fuselajes de aviones. Según Liu (2024), la integración de nanocelulosa con PVDF mejora significativamente la flexibilidad y la estabilidad térmica del dispositivo, lo que permite su uso en entornos extremos.

Además, investigaciones recientes han demostrado que la funcionalización química de la nanocelulosa con PVDF puede mejorar la sensibilidad del sensor al aumentar su área superficial y permitir una mejor interacción con los estímulos mecánicos (Chinga-Carrasco, 2011). Estos sensores son ideales para aplicaciones donde la ligereza y la resistencia son factores críticos, como en sistemas de control de vuelo o en drones.

En el contexto de la industria aeroespacial, los sensores basados en PVDF y nanocelulosa han sido utilizados para monitorear la integridad estructural de componentes clave, como alas y fuselajes. Según Alfaro Flores et al. (2024), estos dispositivos han sido probados en condiciones simuladas de vuelo, demostrando su capacidad para detectar cambios mínimos en la tensión y deformación de materiales compuestos. Este avance es crucial para prevenir fallas estructurales y reducir costos de mantenimiento.

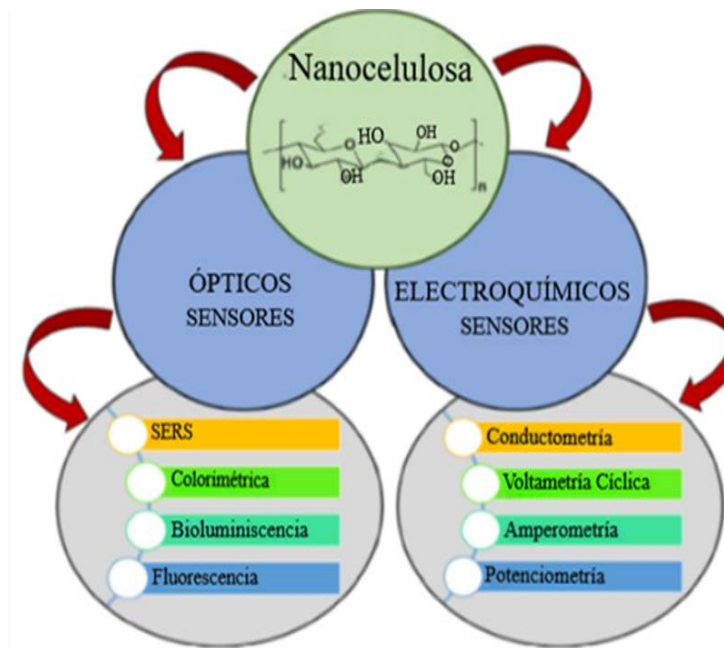
La combinación de PVDF con nanocelulosa también permite la fabricación de sensores más ligeros y resistentes en comparación con materiales tradicionales, como los sensores metálicos o cerámicos (Yang et al., 2020). Esto los convierte en una alternativa sostenible y eficiente para aplicaciones críticas en la industria aeroespacial.

Un ejemplo innovador del uso de PVDF en combinación con nanocelulosa es el desarrollo de sensores para detectar la formación de hielo en las alas de los aviones. Según Yang et al. (2020), investigadores del VTT Technical Research Centre de Finlandia han desarrollado sensores basados en esta combinación que pueden detectar la acumulación de hielo en tiempo real. Esta aplicación es crítica para mejorar la seguridad aérea, ya que la formación de hielo puede afectar negativamente el rendimiento aerodinámico de las aeronaves.

El uso de PVDF en estos sensores permite una respuesta rápida y precisa a los cambios en la superficie del material, mientras que la nanocelulosa proporciona flexibilidad y biodegradabilidad, reduciendo el impacto ambiental del dispositivo (Shoiynbayeva et al., 2021b). El PVDF también se ha utilizado en la fabricación de sensores flexibles para aplicaciones médicas y robóticas. Según Kumar et al. (2022), la combinación de PVDF con nanocelulosa permite la creación de dispositivos portátiles que pueden medir parámetros como la presión arterial, la temperatura corporal o el movimiento muscular. Estos sensores son particularmente útiles en misiones espaciales prolongadas, donde el monitoreo continuo de la salud de los astronautas es esencial. La flexibilidad inherente del PVDF, junto con las propiedades mecánicas mejoradas por la nanocelulosa, permite que estos sensores se adapten a diferentes superficies sin perder funcionalidad (Gañán et al., n.d.). Además, su biocompatibilidad los hace adecuados para aplicaciones biomédicas. Finalmente, la madurez tecnológica de los sensores de nanocelulosa también depende de la colaboración entre academia e industria. Instituciones como la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) han realizado avances significativos en el desarrollo de compuestos biohíbridos que combinan nanocelulosa con nanoestructuras de carbono, mejorando sus propiedades eléctricas y mecánicas (Zuluaga Gallego et al., 2024). Estos esfuerzos demuestran la importancia de la investigación interdisciplinaria para superar los desafíos técnicos y lograr la transición de estos dispositivos desde el laboratorio hasta aplicaciones industriales.

A partir del estudio de literatura científica e investigaciones recientes, se puede dilucidar el estado del arte de las aplicaciones de nanocelulosa a biosensores.

Figura 11 Ilustración de técnicas de sensórica a partir de la nanocelulosa.



Nota. Tomado de Kumar et al., 2022.

En la actualidad existen avances en la utilización o producción de nuevos materiales para diseño y construcción de equipos o naves espaciales (Marchetti et al., 2006), la nanotecnología entra para enfrentar la dificultad de las condiciones extremas a que se ven sometidas las naves y equipos espaciales con el rozamiento atmosférico, velocidad de escape y clima espacial, el diseño e implementación de materiales de cambio de fase permite la resistencia a altas temperaturas y maniobrabilidad aerodinámica de estas naves, (Cárdenas & León, 2013), el desarrollo de materiales nanoparticulados y nanoestructurados permiten estructurar resistencia, limpieza y perdurabilidad en las cubiertas o equipos electrónicos de naves o misiones espaciales (Álvarez, 2019). Uno de los materiales promisorios para ser implementado en procesos de fabricación e implementación de nuevos materiales es la nanocelulosa, que bajo procesos fisicoquímicos sencillos se puede obtener a través de fibras naturales. La nanocelulosa es considerada como un tesoro de la naturaleza por sus componentes de lignina, hemicelulosa y celulosa que contiene la corteza de la madera y otro tipo de materiales orgánicos figura (6 y 7). En muchas estructuras aeroespaciales y aerodinámicas se encuentran compuestos para recubrimiento de fuselaje, alas y estructura interna como de

Carbono-Carbono (C-C), Óxido de Silicio (SiO₂), Silicio amorfo, aleaciones de Aluminio, superaleaciones y vitrocerámica de expansión térmica Zerodour®. Una de las funcionalidades de la nanocelulosa en sus fibras es el reforzamiento de matrices poliméricas de estos compuestos para ofrecer ventajas mecánicas, bajos costos y flexibilidad figura (8). (Saka et al., 2022).

Figura 12

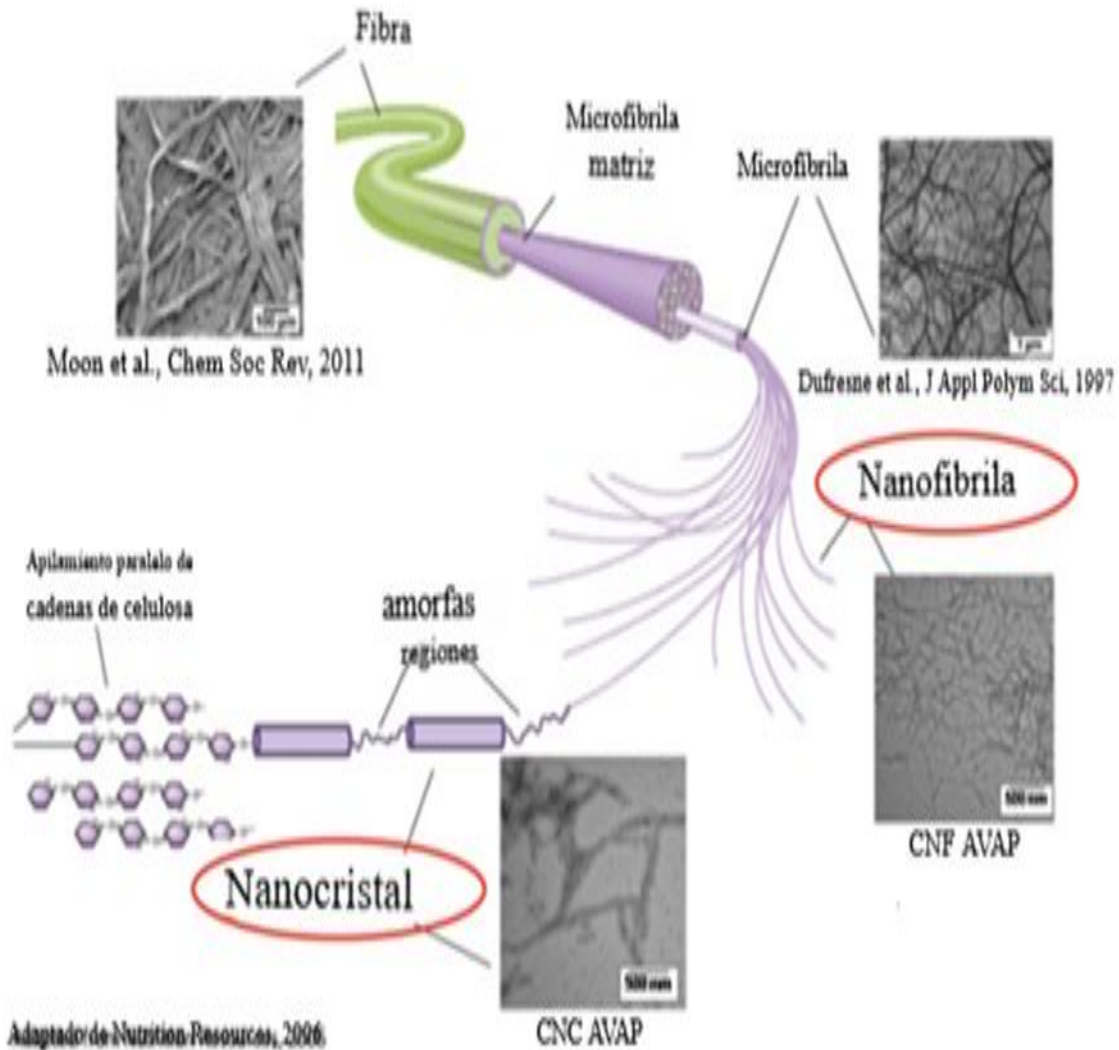
Aplicaciones de la nanocelulosa en la actualidad.



Nota. Adaptado de Nanotechnology Research, 2017

Figura 13

Estructura nanofibrilar de la celulosa.



Nota. Adaptado de Nutrition Resources, 2006.

4.12 Marco Conceptual

Mapa temático de Investigación en la Producción Científica Colombiana

En las figuras 14 y 15 a partir de una herramienta de ciencia métrica denominada Vosviewer®, se organizan por nodos las temáticas mayormente realizadas sobre ciencia y tecnología en Colombia y específicamente en el tema promisorio de nanocelulosa y sus aplicaciones en sensorica

La nanotecnología es fundamental en el desarrollo de sensores de nanocelulosa. Esta teoría se centra en la manipulación de materiales a escala nanométrica, lo que permite mejorar sus propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas (Nanociencias et al., n.d.). La nanocelulosa, al ser un material con dimensiones en la nanoescala, exhibe características como alta resistencia, flexibilidad y biodegradabilidad, aprovechadas en el diseño de sensores eficientes y sostenibles. Los modelos que describen la interacción entre la nanocelulosa y otros nanomateriales, como nanopartículas metálicas (por ejemplo, plata y oro) y grafeno, son cruciales para el diseño de sensores con propiedades mejoradas, como mayor sensibilidad y selectividad en la detección de analitos. Por ejemplo, la integración de nanocelulosa con grafeno puede mejorar las propiedades electroquímicas de los sensores, resultando en dispositivos más eficientes para la detección de biomarcadores y contaminantes (Nanociencias et al., n.d.).

Los sensores electroquímicos basados en nanocelulosa utilizan principios de electroquímica para detectar analitos. Estos modelos se centran en la respuesta de la corriente eléctrica a cambios en la concentración de un analito específico. La alta área superficial de la nanocelulosa permite una mayor interacción con los analitos, lo que mejora la sensibilidad del sensor. Además, la biocompatibilidad de la nanocelulosa la hace adecuada para aplicaciones biomédicas (Smith et al., 2006). Los sensores ópticos que incorporan nanocelulosa utilizan principios de fotónica y plasmones para detectar cambios en la luz reflejada o transmitida. Estos modelos se basan en la capacidad de la nanocelulosa para modificar las propiedades ópticas de los materiales con los que se combina, como los quantum dots, permitiendo el desarrollo de sensores que pueden detectar cambios en la concentración de sustancias químicas o biológicas a través de cambios en la fluorescencia o la absorbancia (Nanociencias et al., n.d.).

Investigaciones recientes han demostrado la eficacia de los sensores de nanocelulosa en la detección de biomarcadores relacionados con enfermedades, como el cáncer y la diabetes. Estos dispositivos son fáciles de usar y pueden aplicarse directamente en la piel para monitorear parámetros de salud (Shoiynbayeva et al., 2021b). Se han desarrollado sensores de movimiento y pH que utilizan nanocelulosa, mostrando alta sensibilidad y estabilidad. Estos sensores tienen aplicaciones en monitoreo ambiental y en la industria alimentaria, donde la detección precisa de condiciones es crucial (Kumar et al., 2022). El futuro del diseño de sensores de nanocelulosa

incluye la exploración de nuevas combinaciones de materiales y la mejora de técnicas de fabricación, como la impresión 3D, para crear dispositivos más sofisticados y accesibles.

La impresión 3D se ha convertido en una técnica clave para la fabricación de sensores de nanocelulosa. Investigadores han desarrollado chips analíticos utilizando nanocelulosa como "tinta", mezclándola con nanocables de plata para crear estructuras eléctricamente conductoras. Esta técnica permite la creación de sensores flexibles y biocompatibles que pueden adherirse a la piel, facilitando la medición de parámetros fisiológicos sin necesidad de punciones (Reshmy et al., 2020). Los sensores de nanocelulosa a menudo se fabrican mediante métodos de recubrimiento que combinan nanocelulosa con nanopartículas metálicas, como plata y oro. Estas combinaciones mejoran la sensibilidad y selectividad de los sensores, permitiendo la detección de analitos específicos en aplicaciones biomédicas y ambientales. La nanocelulosa proporciona una matriz flexible y porosa que mejora la interacción con los analitos (Mishra et al., 2020). Para los sensores que se aplican en entornos biomédicos, es crucial cumplir con normativas de biocompatibilidad, como las establecidas por la ISO 10993, que evalúan la respuesta biológica de los materiales en contacto con tejidos humanos. Los sensores destinados a aplicaciones médicas deben cumplir con regulaciones específicas, como las de la FDA o la CE en Europa, que garantizan que los dispositivos son seguros y eficaces para su uso en diagnóstico y monitoreo de salud (Pater & Curto, 2007a). Los sensores utilizados en la industria deben cumplir con estándares de seguridad y eficiencia, como los establecidos por la IEC y la ISO 9001 para sistemas de gestión de calidad, asegurando que operen de manera confiable en diversas condiciones ambientales y de uso. Aunque se han realizado avances significativos en la investigación y desarrollo de sensores de nanocelulosa, la transición de prototipos a producción a gran escala aún presenta desafíos. La mayoría de los estudios se centran en aplicaciones específicas y no abordan cómo escalar la producción de estos sensores para su uso comercial en diversas industrias. A pesar de que existen normativas generales sobre biocompatibilidad y seguridad para dispositivos médicos, no hay estándares específicos establecidos para los sensores de nanocelulosa, dificultando su aceptación en el mercado y la confianza de los consumidores (Smith et al., 2006). La durabilidad de los sensores de nanocelulosa en condiciones reales de uso no ha sido suficientemente investigada, y se necesita más información sobre cómo estos sensores responden a condiciones extremas, como cambios de temperatura, humedad y presión. La investigación sobre la integración de sensores de nanocelulosa con

tecnologías preexistentes es aún incipiente, y la falta de estudios sobre esta integración puede limitar su adopción en el mercado (Shoiynbayeva et al., 2021b).

Los métodos de fabricación, como la impresión 3D, han permitido la creación de sensores flexibles y biocompatibles que pueden integrarse fácilmente en dispositivos médicos. La combinación de nanocelulosa con nanopartículas metálicas, como la plata, ha mejorado la conductividad eléctrica de los sensores, crucial para su funcionamiento en aplicaciones de monitoreo de parámetros fisiológicos y ambientales (Smith et al., 2006). Los sensores de nanocelulosa están siendo diseñados para una amplia gama de aplicaciones, desde la detección de biomarcadores en el diagnóstico médico hasta el monitoreo de variables ambientales como la temperatura y la humedad, transformando la forma en que se realizan diagnósticos y se gestionan condiciones de salud (Shoiynbayeva et al., 2021b).

La nanocelulosa se presenta como una alternativa viable a materiales sintéticos como el plástico y el vidrio, contribuyendo a la reducción de residuos y al desarrollo de tecnologías más sostenibles. Su capacidad para ser producida a partir de recursos renovables y su biodegradabilidad la posicionan como un material clave en la transición hacia una economía circular y respetuosa con el medio ambiente. A pesar de los avances, existen desafíos en la escalabilidad de la producción y la estandarización de los sensores de nanocelulosa. La falta de normativas específicas y estudios sobre la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de estos dispositivos son áreas que requieren atención. Sin embargo, la investigación continua y la innovación en técnicas de fabricación ofrecen oportunidades significativas para la expansión de esta tecnología en el mercado. La posibilidad de integrar sensores de nanocelulosa con tecnologías preexistentes es un aspecto crucial para su adopción, facilitando su implementación en el monitoreo de salud y en aplicaciones industriales (Shoiynbayeva et al., 2021b).

Los sensores basados en nanocelulosa están emergiendo como una tecnología innovadora en la industria aeronáutica y aeroespacial, gracias a sus propiedades únicas y su capacidad para mejorar la eficiencia y seguridad de los sistemas. La nanocelulosa, un material derivado de la celulosa presenta características como alta resistencia, flexibilidad, y biodegradabilidad, lo que la hace ideal para aplicaciones en sensores (Álvarez et. Al 2019)

Los sensores son componentes críticos en la industria aeroespacial, encargados de monitorear diversas variables como presión, temperatura, y humedad en entornos extremos. Su

función es vital para garantizar la seguridad y el rendimiento de aeronaves y naves espaciales, donde cualquier error en la medición podría tener consecuencias graves. La precisión y fiabilidad de estos dispositivos son esenciales para el funcionamiento adecuado de sistemas como motores, controles de vuelo y sistemas hidráulicos (Devreese, 2007).

Los sensores de nanocelulosa buscan:

Mejorar la Sensibilidad y Precisión: Gracias a su alta área superficial y propiedades mecánicas, los sensores de nanocelulosa pueden detectar cambios sutiles en las condiciones ambientales, lo que es crucial para aplicaciones en aeronáutica.

Reducir el Peso: La ligereza de la nanocelulosa contribuye a la reducción del peso total de las aeronaves, lo que mejora la eficiencia del combustible y el rendimiento general.

Sostenibilidad: Al ser un material biodegradable y renovable, la nanocelulosa representa una opción más ecológica en comparación con los materiales tradicionales utilizados en la fabricación de sensores.

Versatilidad en Aplicaciones: Estos sensores pueden adaptarse para medir diferentes parámetros, desde la detección de gases hasta el monitoreo de estructuras, lo que los hace útiles en diversas aplicaciones dentro de la industria aeroespacial. (Kumar et al., 2022)

Los sensores son dispositivos que detectan y responden a estímulos o cambios en las condiciones físicas del entorno, como presión, temperatura, humedad, luz, etc. Su función principal es convertir estas magnitudes físicas en señales eléctricas que pueden ser procesadas y analizadas por sistemas electrónicos o computarizados (Mundo Nano, n.d.)

Los sensores desempeñan un papel crucial en la industria aeronáutica y aeroespacial, donde se utilizan para monitorear y controlar diversos sistemas críticos, como:

Motores: Miden parámetros como presión, temperatura y flujo de combustible para optimizar el rendimiento y detectar problemas.

Sistemas hidráulicos y de combustible: Monitorean la presión y el nivel de fluidos para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

Sistemas de control de vuelo: Miden variables como ángulo de ataque, velocidad del aire y altitud para mantener el control de la aeronave.

Sistemas de monitoreo de salud y uso: Recopilan datos sobre el estado y el uso de los componentes para programar el mantenimiento y prevenir fallas.

Sistemas de control de clima y aire en la cabina: Controlan la temperatura, humedad y presión del aire para mantener un ambiente confortable y seguro para los pasajeros y la tripulación. (Nanociencias et al., n.d.).

Los sensores también se utilizan en sistemas de frenos, neumáticos, aterrizaje, propulsión auxiliar, aplicaciones espaciales y satelitales, donde la precisión y fiabilidad son fundamentales.

La nanocelulosa es un material innovador derivado de la celulosa, que se obtiene a partir de fuentes vegetales como la pulpa de madera y el algodón. Este material se caracteriza por sus dimensiones en la nanoescala, lo que le confiere propiedades excepcionales que lo posicionan como un candidato prometedor en diversas aplicaciones industriales (Mishra et al., 2020).

La Nanocelulosa posee algunas propiedades como las siguientes:

4.12.1 Alta Resistencia

La nanocelulosa supera al acero en resistencia, soportando tensiones de hasta 10,000 megapascales, lo que la hace extremadamente robusta.

4.12.2 Ligereza

Con un peso de aproximadamente 1,500 kg por metro cúbico, es más ligera que el aluminio, lo que contribuye a la reducción de peso en aplicaciones donde cada gramo cuenta.

4.12.3 Biodegradabilidad

Al ser un material natural, la nanocelulosa es completamente biodegradable, lo que la convierte en una opción sostenible frente a materiales sintéticos.

4.12.4 Versatilidad

Puede ser utilizada en diversas formas, incluyendo nanofibras de celulosa, nanocristales y nanocelulosa bacteriana, cada una con propiedades específicas que permiten su adaptación a diferentes aplicaciones.

4.12.5 Baja Toxicidad

Es un material no tóxico, lo que lo hace seguro para su uso en aplicaciones biomédicas y alimentarias.

4.12.6 Propiedades Modificadoras

Actúa como un modificador reológico, lo que significa que puede alterar la viscosidad y la textura de las soluciones en las que se incorpora, mejorando su funcionalidad en productos como alimentos y farmacéuticos (Reshmy et al., 2020)

Adicionalmente la Nanocelulosa tiene las siguientes ventajas:

Sostenibilidad: Su producción puede realizarse sin necesidad de talar árboles, utilizando subproductos de la industria maderera, lo que promueve la economía circular.

Eficiencia Energética: La producción de nanocelulosa puede ser menos intensiva en energía en comparación con otros materiales, lo que reduce la huella de carbono asociada.

Amplia Gama de Aplicaciones: Se utiliza en sectores que van desde la industria automotriz y aeroespacial hasta la medicina, la electrónica y el packaging, gracias a su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas y funcionales de los productos.

Innovación en Tecnología: La nanocelulosa está en la vanguardia de la investigación en materiales, ofreciendo soluciones para desafíos contemporáneos como la reducción de plásticos y la creación de bioproductos funcionales. (Pater & Curto, 2007a)

Existen usos actuales de los sensores para la industria aeronáutica y astronáutica como son:

- a) **Sensores de Presión:** Utilizados en motores, sistemas hidráulicos y de combustible, los sensores de presión son esenciales para medir y controlar la presión de fluidos y gases. Esto garantiza que los sistemas operen dentro de los parámetros seguros, optimizando así el rendimiento general del avión
- b) **Sensores de Temperatura:** Estos sensores monitorizan la temperatura en diferentes partes del avión, incluyendo motores y sistemas de frenos. Mantener temperaturas adecuadas es crucial para prevenir fallos mecánicos y asegurar un funcionamiento eficiente
- c) **Sensores de Vibración:** Ayudan a detectar anomalías en el funcionamiento de componentes mecánicos, lo que permite identificar problemas antes de que se conviertan en fallos críticos. Esto es vital para el mantenimiento predictivo y la seguridad de la aeronave

Algunos de los rasgos de mantenimiento de los sensores son los siguientes:

Análisis de Datos: Los sensores recopilan datos operativos que se analizan para predecir fallas mecánicas. Esto permite a las compañías implementar estrategias de mantenimiento predictivo, lo que reduce costos y mejora la disponibilidad de las aeronaves

Sensores de Salud y Uso: Estos sensores monitorean el estado y el uso de componentes críticos, proporcionando información que ayuda a planificar el mantenimiento y a evitar fallos inesperados. Esto incluye sistemas de monitoreo en tiempo real que alertan sobre condiciones que podrían comprometer la seguridad

Sensores de Impacto: Recientemente, se han desarrollado sensores que evalúan el impacto durante el aterrizaje, proporcionando datos precisos sobre la suavidad del aterrizaje. Esta información es crucial para el mantenimiento de los trenes de aterrizaje y puede ayudar a optimizar otros sistemas de la aeronave.

La investigación sobre sensores basados en nanocelulosa ha avanzado significativamente en los últimos años, con desarrollos prometedores en diversas aplicaciones. Algunos de los avances más relevantes incluyen:

Sensores de pH y Humedad

Investigadores han desarrollado sensores de pH y humedad basados en nanocelulosa que exhiben alta sensibilidad y estabilidad. Estos sensores utilizan nanocelulosa combinada con nanopartículas metálicas o polímeros conductores para detectar cambios en el pH y la humedad del entorno.

Sensores de Temperatura y Deformación

Se han reportado sensores de temperatura y deformación flexibles y biocompatibles basados en nanocelulosa. Estos dispositivos pueden monitorear cambios de temperatura y deformación mecánica con alta precisión, lo que los hace adecuados para aplicaciones en piel artificial y robótica.

Sensores Ópticos

La nanocelulosa se ha integrado en sensores ópticos para la detección de biomarcadores, gases tóxicos y contaminantes. Estos sensores combinan la nanocelulosa con nanopartículas fluorescentes o materiales plasmónicos para amplificar las señales ópticas.

Sensores Electroquímicos

Se han desarrollado sensores electroquímicos basados en nanocelulosa para la detección de glucosa, ácido úrico y otros analitos de interés biomédico. Estos sensores aprovechan la alta área superficial y la biocompatibilidad de la nanocelulosa para mejorar el rendimiento electroquímico.

Sensores Piezoeléctricos

Investigadores han fabricado sensores piezoeléctricos utilizando nanocelulosa combinada con materiales piezoeléctricos como el PVDF. Estos sensores pueden detectar vibraciones y movimientos con alta sensibilidad, lo que los hace útiles para aplicaciones en monitoreo estructural y robótica.

Recientemente, se han reportado avances en la fabricación de sensores basados en nanocelulosa utilizando técnicas como impresión 3D y deposición por plasma. Estos métodos permiten la producción de sensores con geometrías complejas y la integración de múltiples funcionalidades en un solo dispositivo. En el futuro, se espera que los sensores basados en nanocelulosa se integren en sistemas inteligentes para el monitoreo ambiental, la atención médica y la robótica. La combinación de la nanocelulosa con otros nanomateriales como el grafeno y los polímeros conductores promete mejorar aún más el rendimiento y la versatilidad de estos sensores

El diseño de sensores basados en nanocelulosa se fundamenta en diversas teorías y modelos que abordan sus propiedades únicas y su integración con otros nanomateriales. A continuación, se presentan algunas de las teorías y enfoques más relevantes en este campo.

4.13 Teoría de la Nanotecnología Aplicada a Sensórica

La nanotecnología es fundamental en el desarrollo de sensores de nanocelulosa. Esta teoría se centra en la manipulación de materiales a escala nanométrica, lo que permite mejorar sus propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas. La nanocelulosa, al ser un material con dimensiones en la nanoescala, exhibe características como alta resistencia, flexibilidad y biodegradabilidad, que son aprovechadas en el diseño de sensores eficientes y sostenibles.

4.14 Modelos de Interacción de Materiales

Los modelos que describen la interacción entre la nanocelulosa y otros nanomateriales, como nanopartículas metálicas (por ejemplo, plata y oro) y grafeno, son cruciales para el diseño de sensores. Estas combinaciones permiten la creación de sensores con propiedades mejoradas, como mayor sensibilidad y selectividad en la detección de analitos. Por ejemplo, la integración de nanocelulosa con grafeno puede mejorar las propiedades electroquímicas de los sensores, lo que resulta en dispositivos más eficientes para la detección de biomarcadores y contaminantes.

4.15 Modelos de Sensores Electroquímicos

Los sensores electroquímicos basados en nanocelulosa utilizan principios de electroquímica para detectar analitos. Estos modelos se centran en la respuesta de la corriente eléctrica a cambios en la concentración de un analito específico. La alta área superficial de la nanocelulosa permite una mayor interacción con los analitos, lo que mejora la sensibilidad del sensor. Además, la biocompatibilidad de la nanocelulosa la hace adecuada para aplicaciones biomédicas.

4.16 Modelos de Sensores Ópticos

Los sensores ópticos que incorporan nanocelulosa utilizan principios de fotónica y plasmones para detectar cambios en la luz reflejada o transmitida. Estos modelos se basan en la capacidad de la nanocelulosa para modificar las propiedades ópticas de los materiales con los que se combina, como los quantum dots. Esto permite el desarrollo de sensores que pueden detectar cambios en la concentración de sustancias químicas o biológicas a través de cambios en la fluorescencia o la absorbancia (Nanociencias et al., n.d.).

Existen investigaciones relevantes y desarrollos recientes enumeradas a continuación:

Aplicaciones en Detección de Biomarcadores

Investigaciones recientes han demostrado la eficacia de los sensores de nanocelulosa en la detección de biomarcadores relacionados con enfermedades, como el cáncer y la diabetes. Estos dispositivos son fáciles de usar y pueden aplicarse directamente en la piel para monitorear parámetros de salud.

Sensores de Movimiento y pH

Se han desarrollado sensores de movimiento y pH que utilizan nanocelulosa, mostrando alta sensibilidad y estabilidad. Estos sensores tienen aplicaciones en monitoreo ambiental y en la industria alimentaria, donde la detección precisa de condiciones es crucial.

Futuras Direcciones

El futuro del diseño de sensores de nanocelulosa incluye la exploración de nuevas combinaciones de materiales y la mejora de técnicas de fabricación, como la impresión 3D, para crear dispositivos más sofisticados y accesibles. La investigación continúa enfocándose en la integración de la nanocelulosa con tecnologías existentes para maximizar su funcionalidad y aplicabilidad en diversas industrias.

4.17 Tecnologías Utilizadas en la Fabricación de Sensores de Nanocelulosa

4.17.1 Impresión 3D

La impresión 3D se ha convertido en una técnica clave para la fabricación de sensores de nanocelulosa. Investigadores han desarrollado chips analíticos utilizando nanocelulosa como "tinta", mezclándola con nanocables de plata para crear estructuras eléctricamente conductoras.

Esta técnica permite la creación de sensores flexibles y biocompatibles que pueden adherirse a la piel, facilitando la medición de parámetros fisiológicos sin necesidad de punciones.

4.17.2 Métodos de Recubrimiento y Composición

Los sensores de nanocelulosa a menudo se fabrican mediante métodos de recubrimiento que combinan nanocelulosa con nanopartículas metálicas, como plata y oro. Estas combinaciones mejoran la sensibilidad y selectividad de los sensores, permitiendo la detección de analitos específicos en aplicaciones biomédicas y ambientales. La nanocelulosa proporciona una matriz flexible y porosa que mejora la interacción con los analitos.

4.18 Técnicas de Nanotecnología y sus aplicaciones

La nanotecnología permite la manipulación de la nanocelulosa para crear diferentes formas, como nanofibras y nanocristales. Estas estructuras tienen propiedades mecánicas y ópticas mejoradas, lo que las hace ideales para aplicaciones en sensores. Por ejemplo, la nanocelulosa se puede utilizar para crear sensores ópticos que detectan cambios en la luz reflejada o transmitida, ampliando su funcionalidad en la detección de biomarcadores y contaminantes.

4.19 Métodos de Funcionamiento de Sensores de Nanocelulosa

- Sensores Electroquímicos

Los sensores electroquímicos basados en nanocelulosa funcionan midiendo la corriente eléctrica generada por reacciones químicas en la superficie del sensor. La alta área superficial de la nanocelulosa permite una mayor interacción con los analitos, lo que resulta en una mayor sensibilidad. Estos sensores son utilizados para medir parámetros como glucosa y otros biomarcadores en aplicaciones médicas.

- **Sensores Ópticos**

Los sensores ópticos que incorporan nanocelulosa utilizan principios de fotónica para detectar cambios en la luz. La combinación de nanocelulosa con quantum dots o nanopartículas metálicas permite la creación de dispositivos que responden a la presencia de analitos a través de cambios en la fluorescencia o absorbancia. Esto es útil en la detección de sustancias químicas y biomarcadores en muestras biológicas.

- **Sensores de Movimiento y Deformación**

La nanocelulosa también se utiliza en sensores que detectan movimiento y deformación. Estos sensores pueden medir cambios en la resistencia eléctrica o capacitancia cuando se aplican fuerzas mecánicas. Esto los hace adecuados para aplicaciones en monitoreo estructural y robótica, donde la flexibilidad y la sensibilidad son esenciales

4.20 Normativas y Estándares

Para los sensores que se aplican en entornos biomédicos, es crucial cumplir con normativas de biocompatibilidad. Estas normativas, como las establecidas por la ISO 10993, evalúan la respuesta biológica de los materiales en contacto con tejidos humanos. Los sensores de nanocelulosa, al ser biocompatibles y biodegradables, deben demostrar que no provocan reacciones adversas en el cuerpo.

Los sensores destinados a aplicaciones médicas deben cumplir con regulaciones específicas, como las de la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU.) o la CE (Conformité Européenne) en Europa. Estas certificaciones garantizan que los dispositivos son seguros y eficaces para su uso en diagnóstico y monitoreo de salud.

Los sensores utilizados en la industria deben cumplir con estándares de seguridad y eficiencia, como los establecidos por la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) y la ISO 9001 para sistemas de gestión de calidad. Estas normativas aseguran que los sensores operen de manera confiable en diversas condiciones ambientales y de uso.

Los sensores de nanocelulosa deben someterse a pruebas rigurosas para evaluar su rendimiento en condiciones reales. Esto incluye pruebas de sensibilidad, selectividad y estabilidad

a lo largo del tiempo. Los métodos de evaluación pueden incluir simulaciones y ensayos en entornos controlados.

La durabilidad de los sensores es un factor crítico, especialmente en aplicaciones donde se espera un uso prolongado. Las pruebas de ciclos de vida evalúan cómo los sensores responden a condiciones extremas, como cambios de temperatura, humedad y presión.

La implementación de sistemas de gestión de calidad, como la ISO 13485, es esencial para la fabricación de dispositivos médicos. Esta norma se centra en la gestión de la calidad en la producción de dispositivos médicos, asegurando que se sigan procesos estandarizados y se mantenga un control riguroso sobre la calidad del producto final.

Aunque se han realizado avances significativos en la investigación y desarrollo de sensores de nanocelulosa, la transición de prototipos a producción a gran escala aún presenta desafíos. La mayoría de los estudios se centran en aplicaciones específicas y no abordan cómo escalar la producción de estos sensores para su uso comercial en diversas industrias.

A pesar de que existen normativas generales sobre biocompatibilidad y seguridad para dispositivos médicos, no hay estándares específicos establecidos para los sensores de nanocelulosa. Esto puede dificultar la aceptación en el mercado y la confianza de los consumidores, ya que los fabricantes pueden no tener directrices claras sobre cómo cumplir con los requisitos regulatorios.

La durabilidad de los sensores de nanocelulosa en condiciones reales de uso no ha sido suficientemente investigada. Aunque se conocen sus propiedades mecánicas y biocompatibilidad, se necesita más información sobre cómo estos sensores se comportan a lo largo del tiempo, especialmente en aplicaciones biomédicas donde la fiabilidad es crucial.

La investigación sobre la integración de sensores de nanocelulosa con tecnologías preexistentes es aún incipiente. A medida que se desarrollan nuevos dispositivos, es fundamental que los sensores sean compatibles con sistemas y tecnologías ya establecidos. La falta de estudios sobre esta integración puede limitar la adopción y el uso de sensores de nanocelulosa en el mercado.

Aunque la nanocelulosa es considerada un material sostenible y biodegradable, se necesita más investigación sobre su ciclo de vida completo y su impacto ambiental. Esto incluye estudios sobre la producción, uso y descomposición de los sensores de nanocelulosa, así como su comparación con materiales tradicionales en términos de sostenibilidad.

La investigación actual se centra en la mezcla de nanocelulosa con nanopartículas de plata para mejorar la conductividad eléctrica. Sin embargo, hay una brecha en el desarrollo de materiales conductores alternativos que sean igualmente efectivos y más sostenibles. Esto podría abrir nuevas posibilidades para sensores completamente biodegradables y menos tóxicos

Los sensores de nanocelulosa están siendo diseñados para una amplia gama de aplicaciones, desde la detección de biomarcadores en el diagnóstico médico hasta el monitoreo de variables ambientales como la temperatura y la humedad. Esto incluye la medición de parámetros metabólicos relevantes, lo que podría transformar la forma en que se realizan diagnósticos y se gestionan condiciones de salud.

La nanocelulosa se presenta como una alternativa viable a materiales sintéticos como el plástico y el vidrio, contribuyendo a la reducción de residuos y al desarrollo de tecnologías más sostenibles. Su capacidad para ser producida a partir de recursos renovables y su biodegradabilidad la posicionan como un material clave en la transición hacia una economía circular y respetuosa con el medio ambiente.

4.21 Desafíos y Oportunidades Futuras

A pesar de los avances, existen desafíos en la escalabilidad de la producción y la estandarización de los sensores de nanocelulosa. La falta de normativas específicas y estudios sobre la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de estos dispositivos son áreas que requieren atención. Sin embargo, la investigación continua y la innovación en técnicas de fabricación ofrecen oportunidades significativas para la expansión de esta tecnología en el mercado.

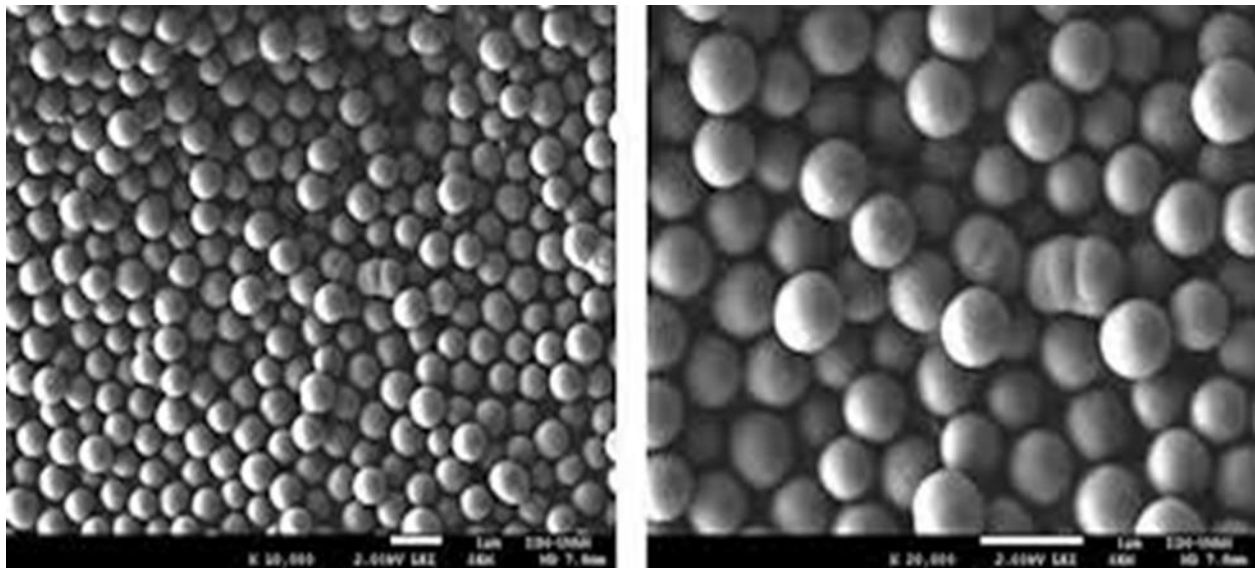
La posibilidad de integrar sensores de nanocelulosa con tecnologías preexistentes es un aspecto crucial para su adopción. La investigación se está enfocando en desarrollar dispositivos que sean fáciles de usar y que puedan ser aplicados directamente en la piel, lo que facilitaría su implementación en el monitoreo de salud y en aplicaciones industriales (Shoynbayeva et al., 2021b).

Los compuestos de nanocelulosa se pueden utilizar en aplicaciones de detección química debido a su alta sensibilidad y selectividad en presencia de grupos hidroxilo presentes en la celulosa a escala nanométrica permitiendo la detección de varios analitos para la detección química de gases, temperatura y humedad (Kumar et al., 2022).

Estudios de propiedades termofísicas en materiales nanoparticulados (Kibria et al., 2015) han permitido desarrollar materiales bajo métodos de producción de nanopartículas en dos grandes grupos: equilibrio termodinámico y equilibrio cinético. En el termodinámico la síntesis o manufactura de nanopartículas consiste en un proceso de supersaturación, siguiendo de un proceso de nucleación y el subsiguiente crecimiento de conglomerados o clústeres (Shah et al., 2022a), se deben controlar las condiciones del proceso para la síntesis de nanopartículas en cuanto a distribución uniforme, dispersión homogénea, idéntica forma geométrica, idéntica composición química obteniendo una sola estructura cristalina y aglutinamiento de partículas. En el momento en que cambia la temperatura (M. Liu et al., 2012) aparece una nueva fase, por esta razón las variables como la presión, la temperatura y la concentración deben ser correctamente controladas (Su et al., 2015) figura (18).

Figura 16

Cambio de fase síntesis de material nanoparticulado.



Nota. Fuente Nasa 2023, www.nasa.gov.

La segunda ley de la termodinámica establece que todo sistema tiende a ir del orden al desorden (Pielichowska & Pielichowski, 2014), estableciendo el concepto de energía libre de Gibbs, la cual, si se diera el cambio produciendo una nueva fase, producirá el crecimiento o

agrupación de los átomos para obtener cristales o nanopartículas, este proceso se da cuando una solución se encuentra en estado de saturación (Pater & Curto, 2007a) (Shoiynbayeva et al., 2021b):

$$\Delta G = -\frac{kT}{\Omega} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{kT}{\Omega} \ln(1 + \sigma) \quad (1)$$

En la ecuación (1), C es la concentración del soluto, C₀ es la concentración de soluto en el estado de equilibrio de la solución, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, omega es el volumen atómico y sigma representa la supersaturación definida como $(C - C_0)/C_0$; cuando no hay supersaturación (Ranjbar et al., 2020), es decir, si sigma es igual a cero, el cambio en la energía libre es cero y la nucleación podría no ocurrir. En 1857 Michael Faraday publicó un extenso estudio sobre la preparación y la obtención de soluciones coloidales de oro, desde entonces se han utilizado una variedad de métodos para la producción de nanopartículas en estados de suspensión. El cambio total de la energía de potencial químico para el comienzo de la formación de núcleos estará dado por:

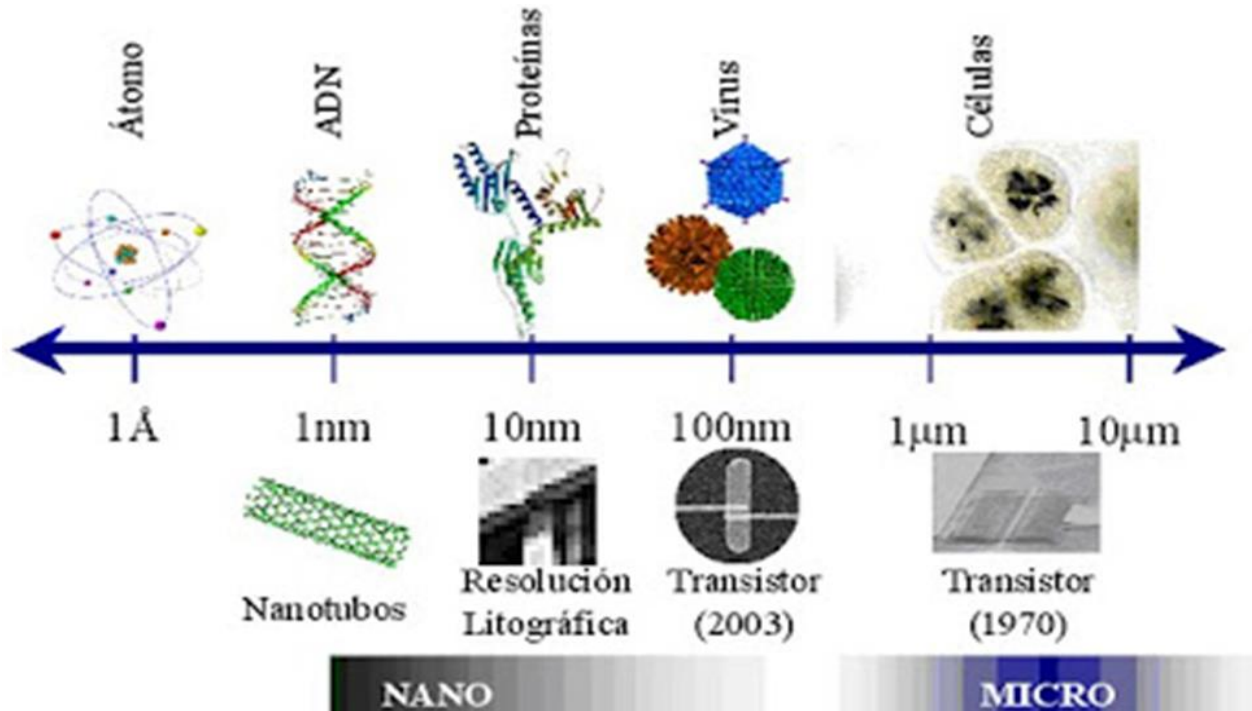
$$\Delta G = \Delta\mu_v + \Delta\mu_s = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2)$$

Esta ecuación da el cambio de energía libre de Gibbs, donde se asume el volumen de las partículas como el de una partícula esférica de radio r, donde μ corresponde al potencial químico y γ a la energía superficial por unidad de área, entendiéndose a ΔG_v , como el cambio de energía libre volumétrica.

El estudio de materiales nanoestructurados y nanoparticulados, en la actualidad ha sido clasificado como una nanorevolución en tecnologías emergentes, ya que al manipular moléculas en escalas atómicas (Giraldo, 2007) ha permitido estudiar la estructura de la materia en sus bloques más simples y lógicos.

Figura 17

Escala Nanométrica.



Nota. Tomado de fuente www.cienciamx.com

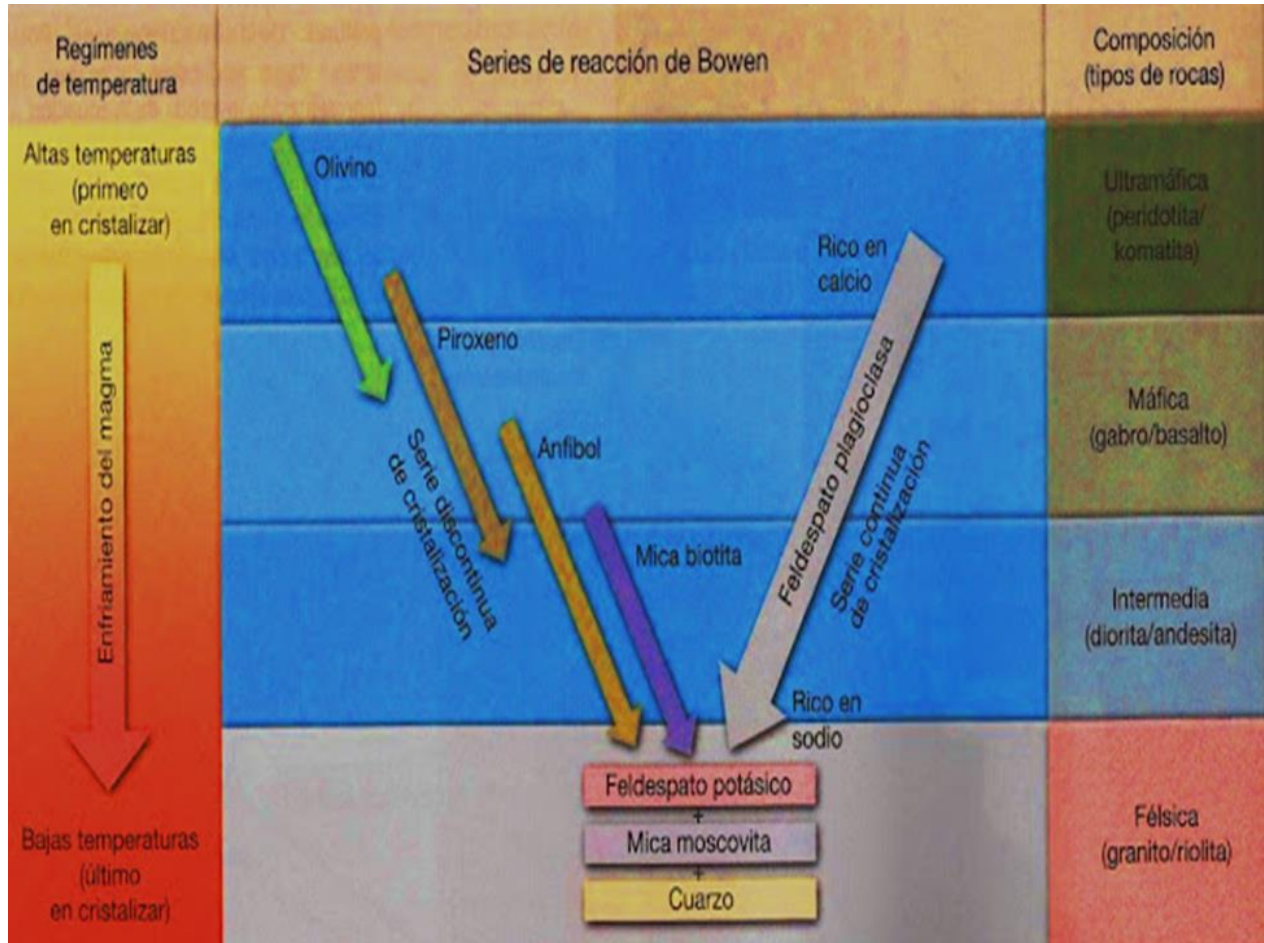
A nivel de formación o estructuración de nuevos materiales existen técnicas vanguardistas a nivel nanoscópico como los nanotubos de carbono, nanopartículas dirigidas, biomarcadores o ligandos que facilitan el estudio o producción masiva y a bajo coste de este tipo de extensiones materiales durables (figura 19) (Chernov et al., 2019).

La capacidad de manipular la materia en escala atómica y molecular es denominada nanotecnología, para analizar la estructura de los componentes nanoestructurados en materiales se utiliza una clasificación llamada serie de Bowen (O'Brien, 2007) donde se dividen en dos secuencias que describen el orden de cristalización de minerales bajo dos factores:

- Termodinámica de proceso de cristalización.
- Composición del magma que se cristaliza (Figura 20).

Figura 18

Serie de Bowen.



Nota. Tomado fuente NASA JPL www.nasa.gov/jpl.

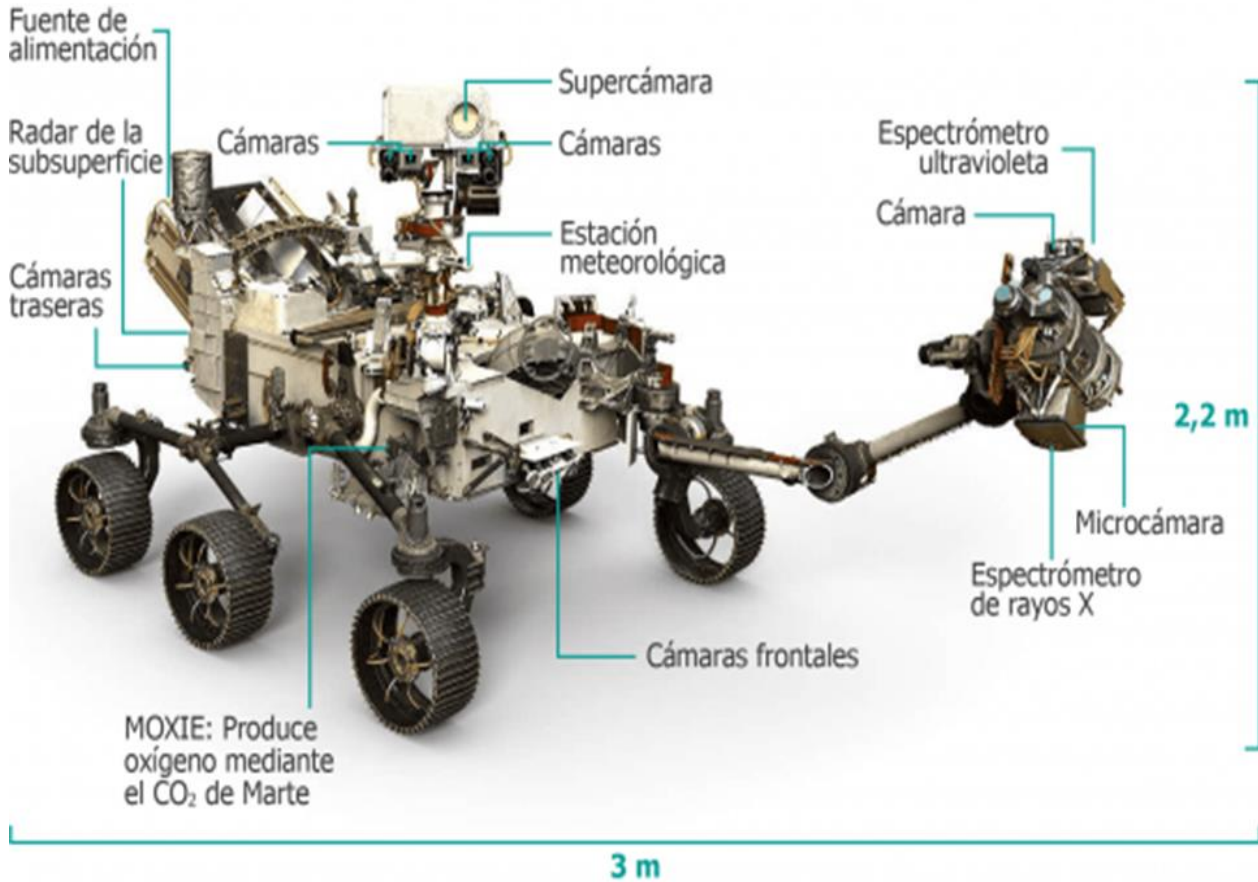
Desde la década de los años setenta la NASA se ha interesado por el estudio de la implementación, caracterización y producción de materiales nanoparticulados y nanoestructurados, hasta el día de hoy existe un buen grupo de misiones y equipos espaciales que han implementado

en sus fuselajes, tecnología electrónica y termofísica recubrimientos de nanopartículas con el objeto de estudiar la resistencia en condiciones extremas o anormales de temperatura, ausencia de atmósfera, presión, astrodinámica y clima espacial de estos componentes nanotecnológicos (Terranova, M. 2022), curiosity, opportunity y perseverance (Figura 19), como misiones de la

NASA han venido estudiando o analizando el comportamiento de componentes y módulos fabricados a partir de la nanotecnología.

Figura 19

Mars Rover Perseverance.



Nota. Tomado fuente NASA JPL.

En la presentación oficial del documento e implementación del acápite de ciencias del espacio en la misión internacional de sabios (2019), se hace énfasis en la implementación de nuevas tecnologías o tecnologías emergentes para el desarrollo de materiales aeroespaciales, donde los materiales nanoparticulados cumplirían un papel fundamental por sus condiciones fisicoquímicas para el desarrollo o la producción aeroespacial. En la incursión de materiales nanotecnológicos, nanoestructurados y nanoparticulados se encuentran las investigaciones del Dr. Chad Mirkin, director del instituto internacional de nanotecnología de la Universidad de Northwestern donde

creo biomarcadores o ligandos a nivel biológico para realizar uniones inter moleculares en la detección contra el cáncer (Muñoz Uribe, 2019), existen nanomateriales utilizados para producir impulsos o energía eléctrica como los nanotubos de carbono desarrollados por el grupo de investigación de nanotecnología de la Universidad de Bari (2015) y las nanopartículas dirigidas elaboradas por los profesores Robert Langer (MIT) y Omid Farokhzad (Harvard Medical School).

La producción de materiales y medios sostenibles reviste vital importancia, la energía solar y sus diferentes transformaciones en la producción de celdas fotovoltaicas de silicio, tomando principios de efecto cuántico para sintetización de procesos energéticos utilizando materiales como plomo (Pb) y azufre (S), uno de los proyectos de investigación pioneros en esta área, se encuentra desarrollando el profesor Ted Sargent del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Toronto (Villamil, 2019) denominado nanocristal-celula solar de estado sólido en el cual se aprovecha gran porcentaje de radiación solar y almacenamiento a un bajo costo frente a la utilización de paneles solares convencionales. Este proyecto se está implementando en Arabia Saudita país que le ha apostado a la transición paulatina de explotación de combustibles fósiles a energías renovables o sustentables. Este tipo de celda nanocristalina solar utiliza no sólo bajo efectos cuánticos el espectro visible sino frecuencias luminosas incluyendo el infrarrojo fenómeno que amplifica la potencia y la absorción de radiación solar en un 90% por cada celda nanocristalina solar.

La profesora e investigadora Vicky Colvin del grupo de investigación de nanomateriales del departamento de química de la universidad de Rice en Texas (Altuna et al., 2019) ha desarrollado junto con sus estudiantes una columna de filtrado para la eliminación de partículas de arsénico (As) presentes en el agua, dicho filtro utiliza óxido de hierro o magnetita presente en la superficie de marte para producir reacciones de purificación y eliminación de contaminantes, este proceso natural se realiza gracias a las nanopartículas presentes en el óxido de hierro (FeO).

La nanoelectrónica utilizada para autoensamblaje de circuitos, resistencia de materiales, sensórica y la invención del grafeno en 2004 por los investigadores Andre Geim y Konstantin Novoselov ganadores del premio nóbel de física en 2010 por este descubrimiento (Urcuyo et al., 2021) aplicado hoy en día para fabricación de microprocesadores de estructura fractal.

En la actualidad se ha establecido un derrotero en la producción de hidrógeno de bajas emisiones como energía alternativa, y la promisorio utilización de la nanotecnología para la producción de este energético.

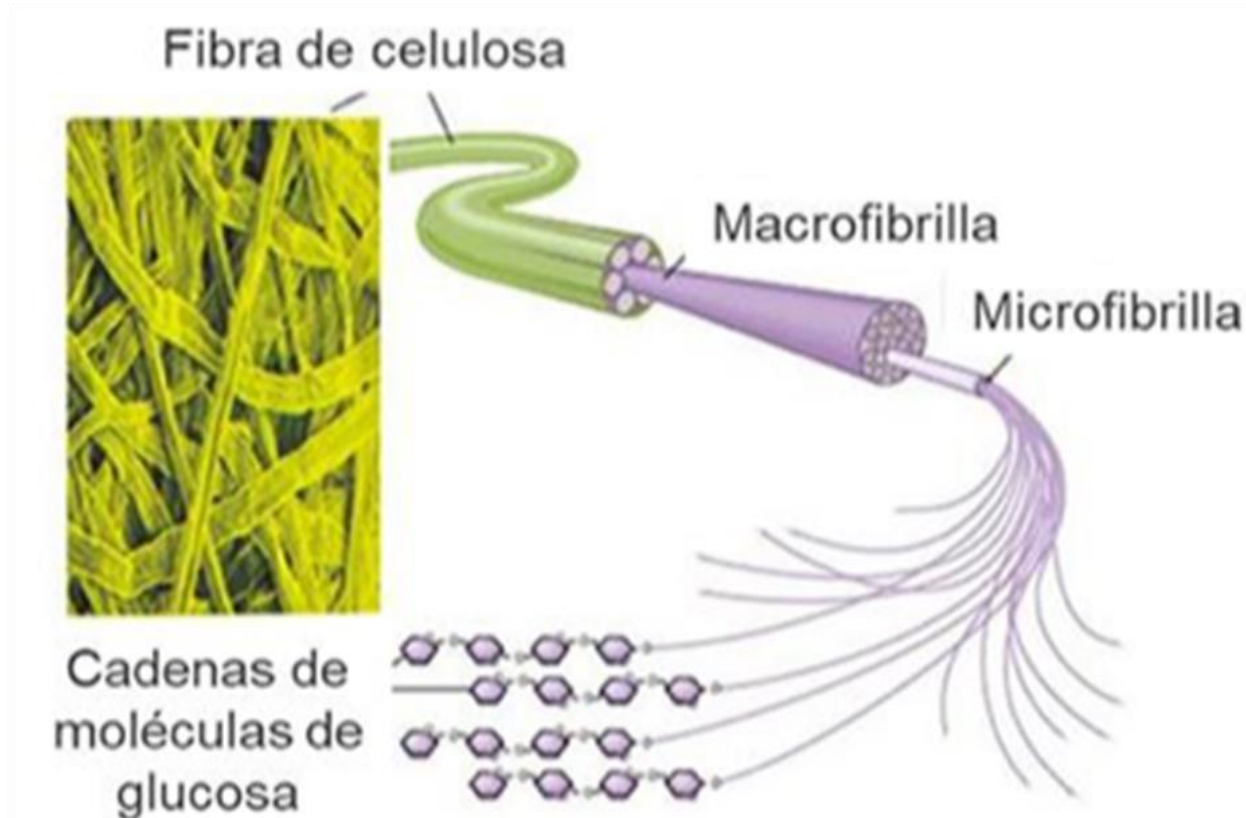
Los nanominerales presentes en la superficie del planeta marte nos permiten un estudio promisorio sobre la producción, extracción y exploración de energéticos a partir del estudio espectroscópico de su composición.

La nanotecnología en algunos composites, materiales o matriz de polímeros está siendo considerada un área muy promisorio (Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 9 No. 16, Enero, n.d., p. 17), dada su resistencia, ventajas mecánicas, durabilidad y maleabilidad. Uno de estos materiales que ofrecen cualidades fisicoquímicas y estructura polimérica resistente para la fabricación o elaboración de materiales aeroespaciales es la nanocelulosa (Castro-Ramos et al., n.d.; Rubio-Pereda et al., 2017), ofreciendo propiedades fibriladas importantes para la flexibilidad en compuestos matriciales poliméricos usados en la industria aeroespacial.

En la literatura científica de los últimos cinco años la nanocelulosa extraída de compuestos vegetales, como material nanotubular (Mishra et al., 2020; Pérez et al., 2021; Zhuo et al., 2017), ha permitido el avance significativo en producción de nuevos materiales sostenibles con el medio ambiente, en regiones como Colombia que gran parte de su producción o sustentabilidad alimentaria se basa en la agricultura por ser zona de extensos y diversos bosques propicios para la cosecha y tratamiento de residuos vegetales orgánicos, donde estos bajo procesos determinados a nivel fisicoquímico e industrial (Marchetti et al., 2006; Pater & Curto, 2007b; Reshmy et al., 2020) se puede elaborar o extraer nanocelulosa como componente fundamental en la fabricación o adecuación de diferentes tipos de materiales poliméricos a nivel aeroespacial caracterizándose por su maleabilidad, versatilidad y adaptabilidad con otro tipo de materiales usualmente usados en ese tipo de industria, figura (20).

Figura 20

Microfibras de celulosa y su estructura.

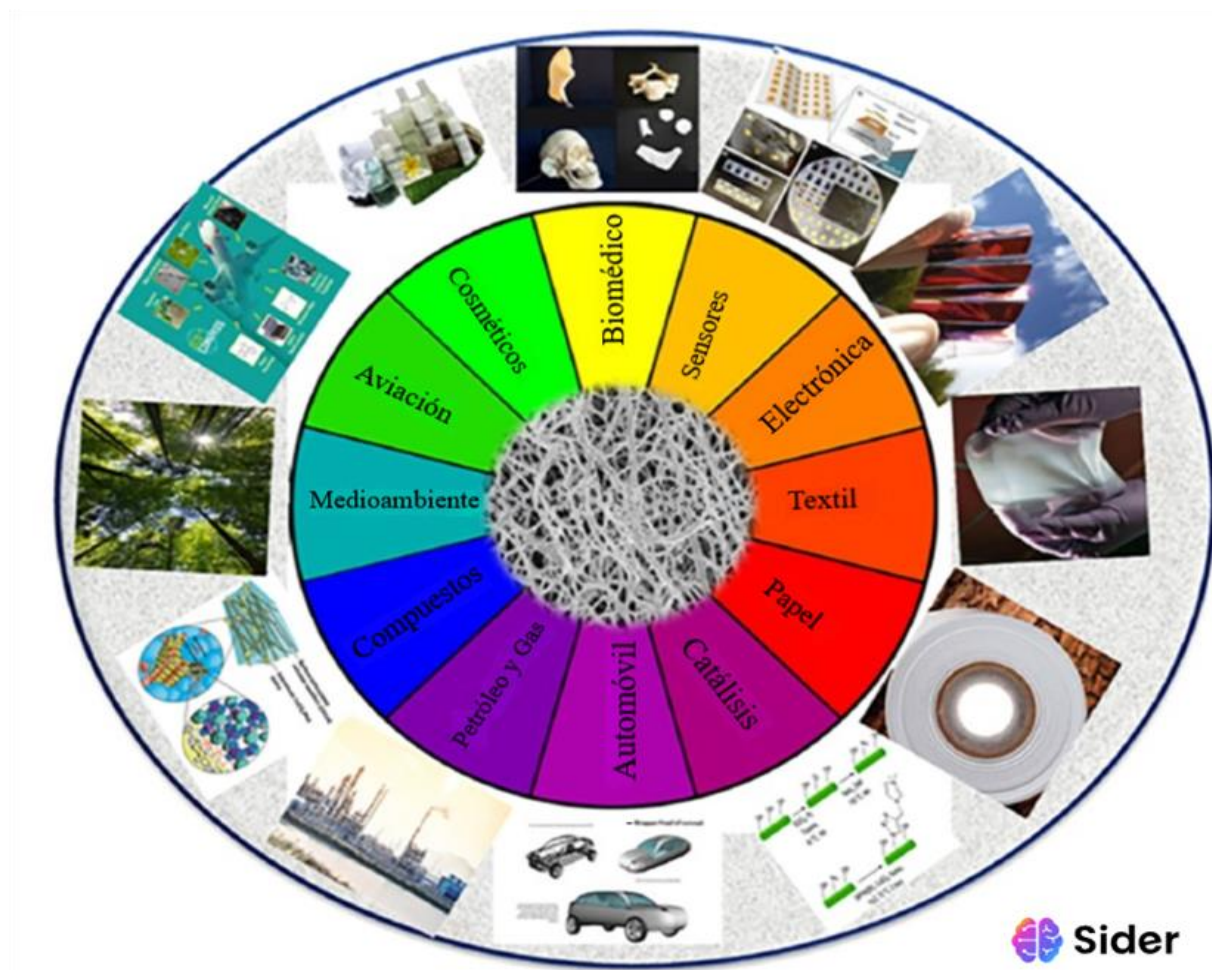


Nota. Tomado fuente: <https://www.muyinteresante.com.mx/preguntas-y-respuestas/nanocelulosa/>.

En la actualidad por la necesidad de transición energética que demanda el planeta tierra, la producción de energéticos para evitar el tratamiento de combustibles fósiles, y la sostenibilidad ambiental se están incursionando en nuevos materiales a nivel nanométrico como la celulosa presente en toda especie vegetal y que puede llegar a ser una opción rentable en la producción o elaboración de matrices poliméricas de recubrimientos para equipos aeroespaciales (Abden et al., 2020; Hyun et al., 2014), existen estudios promisorios sobre implementación y adecuación de materiales composites o compuestos de nanocelulosa para reforzamiento de recubrimientos, construcción de equipos y resistencia de materiales (Shah et al., 2022b; Smith et al., 2006). (figura 23)

Figura 21

Materiales basados en nanocelulosa.



Nota. Tomado fuente <http://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/issue/view/5226>. Adaptado Sider IA.

En la clasificación funcional de los materiales que se toma en el desempeño básico o más importante que realizan ya sea mecánico (estructural), biológico, eléctrico, magnético u óptico, se encuentran los materiales aeroespaciales usados desde el invento del avión por los hermanos Wright al usar materiales ligeros como madera y aleación de aluminio que accidentalmente ofreció más resistencia al motor. En los transbordadores y algunos vehículos espaciales se utilizó polvo de aluminio (Al) para los cohetes impulsores y sílice para las baldosas térmicas protectoras. Los fuselajes de los aviones de la empresa Boeing están compuestos principalmente por plástico

reforzado con fibras de Carbono (Cárdenas & León, 2013; M. Liu et al., 2012; Shoiynbayeva et al., 2021a).

El componente pedagógico o educativo como prospección de la innovación y crecimiento en el estudio de la nanotecnología aplicada existen enfoques integradores de aula en el estudio de investigaciones de frontera en compuestos basados en nanocelulosa (Giraldo Gallo, n.d.; Nanociencias et al., n.d.; Shoiynbayeva et al., 2021b), se están involucrando nuevas metodologías educativas para abordar el tema de nanociencia, nanotecnología y sus derivados. Desde los principios básicos de nanotecnología promulgados por Richard Phillips Feynman en su conferencia “hay mucho espacio de fondo” en el instituto tecnológico de Caltech en 1959, indicaba sobre la proyección de la ciencia hacia lo más pequeño y las utilidades que se podían aprovechar en diversas áreas de conocimiento a través del estudio del mundo nano (Kibria et al., 2015; Pater & Curto, 2007a).

Los estudios actuales sobre matrices poliméricas a base de nanocelulosa han demostrado su baja resistencia, empero la relación de resistencia/peso es muy favorable. No son muy adecuados para su uso en altas temperaturas, tienen resistencia favorable a la corrosión, proporcionan buen aislamiento eléctrico y térmico, pueden ser también muy dúctiles o quebradizos según su estructura, temperatura y velocidad de deformación. (Pielichowska & Pielichowski, 2014; Ranjbar et al., 2020).

5. Metodología

Para garantizar una revisión sistemática y rigurosa de la literatura científica sobre este tema, se empleó la metodología PRISMA-P (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Protocols*), un protocolo ampliamente reconocido a nivel internacional para la planificación, ejecución y documentación de revisiones sistemáticas. Esta herramienta proporciona un marco estructurado que asegura la transparencia, reproducibilidad y calidad científica de los procesos de recolección y análisis documental.

La metodología PRISMA-P contempla etapas clave como la definición del objetivo de la revisión, la formulación de preguntas de investigación, la búsqueda exhaustiva de literatura en bases de datos especializadas, la aplicación de criterios de inclusión y exclusión claramente definidos, y la evaluación crítica de la calidad de los estudios seleccionados (Shoiynbayeva et al., 2021b). En el presente estudio, el objetivo fue recopilar, analizar y sintetizar evidencia científica sobre el uso de nanocelulosa en sensores avanzados, particularmente aquellos orientados a aplicaciones en condiciones extremas dentro de los sectores aeronáutico y aeroespacial.

El proceso metodológico comenzó con la formulación de preguntas específicas, como: ¿Cuáles son las propiedades estructurales y funcionales de la nanocelulosa que la hacen adecuada para sensores aplicados en entornos aeroespaciales? ¿Qué avances recientes han mejorado su integración en dispositivos funcionales bajo condiciones críticas de temperatura, presión o radiación?

Posteriormente, se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos académicas de alto impacto como Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect e IEEE Xplore. Estas bases fueron seleccionadas por su cobertura en ingeniería, ciencia de materiales y nanotecnología. Se emplearon operadores booleanos y descriptores controlados en inglés y español. Algunos ejemplos de ecuaciones de búsqueda utilizadas fueron:

```
("nanocellulose" OR "cellulose nanofibers" OR "CNC" OR "CNF") AND ("sensor*" OR "biosensor*") AND ("aerospace" OR "aeronautics" OR "extreme conditions") ("cellulose sensors" OR "piezoelectric sensor" OR "humidity sensor") AND ("aerospace industry" OR "sustainable technologies")
```

Las siglas CNC (Cellulose Nanocrystals) y CNF (Cellulose Nanofibers) hacen referencia a los dos tipos más comunes de nanocelulosa empleados en sensores. Se limitaron los resultados a publicaciones comprendidas entre los años 2014 y 2024, escritas en inglés o español, revisadas por pares, y con acceso completo al texto. Se excluyeron artículos duplicados, literatura gris sin validación empírica, revisiones no sistemáticas y estudios centrados en otros sectores no relacionados (como el alimentario o textil) como aparece en la tabla 4.

Para la gestión y organización de referencias se utilizó la herramienta digital Rayyan QCRI (Qatar Computing Research Institute), que permitió aplicar filtros colaborativos por parte de dos revisores independientes. En caso de discrepancia, se aplicó una tercera revisión para resolver el conflicto.

Una vez depurada la muestra, se procedió a la evaluación crítica de la calidad metodológica de los estudios incluidos mediante la herramienta CASP (Critical Appraisal Skills Programme). Esta herramienta permitió valorar la solidez de los diseños experimentales, la validez de las mediciones, el control de variables críticas (como temperatura, humedad o presión), y la generalización de los resultados. Se construyó una matriz de análisis con categorías como: claridad de objetivos, representatividad de las muestras, rigor en el análisis de resultados y aplicabilidad a entornos reales (figura 22).

La información extraída fue organizada en tablas temáticas según cinco ejes:

1. Tipo de sensor (electroquímico, piezoeléctrico, óptico, térmico, de humedad)
2. Tipo de nanocelulosa empleada (CNC, CNF, celulosa bacteriana)
3. Propiedades evaluadas (resistencia mecánica, conductividad, estabilidad térmica)
4. Métodos de funcionalización (con grafeno, PVDF, nanopartículas metálicas)
5. Contexto de aplicación (monitoreo estructural, trajes espaciales, cabinas presurizadas).

Tabla 4

Matriz cuantitativa sobre evolución temporal de la investigación en nanocelulosa.

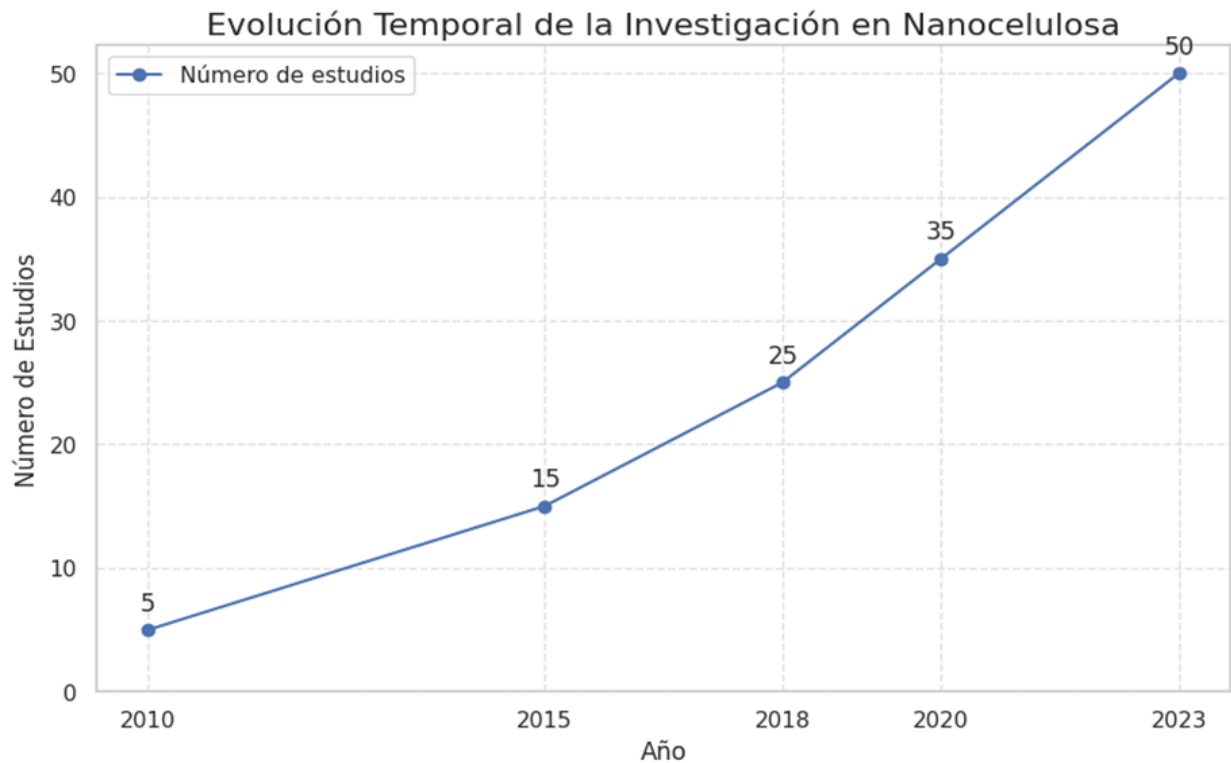
Matriz Cuantitativa: Evolución Temporal de la Investigación en Nanocelulosa

Año	Número de Estudios	Áreas de Aplicación	Técnicas Destacadas
2010	5	Monitoreo estructural	Nanofibrilación mecánica
2015	15	Sensores de temperatura/humedad	Oxidación TEMPO
2018	25	Biosensores	Impresión 3D
2020	35	Sensores de gases	Funcionalización química
2023	50	Integración en sistemas complejos	Deposición por plasma

Nota. Fuente elaboración propia

Figura 22

Evolución temporal de la investigación en nanocelulosa.



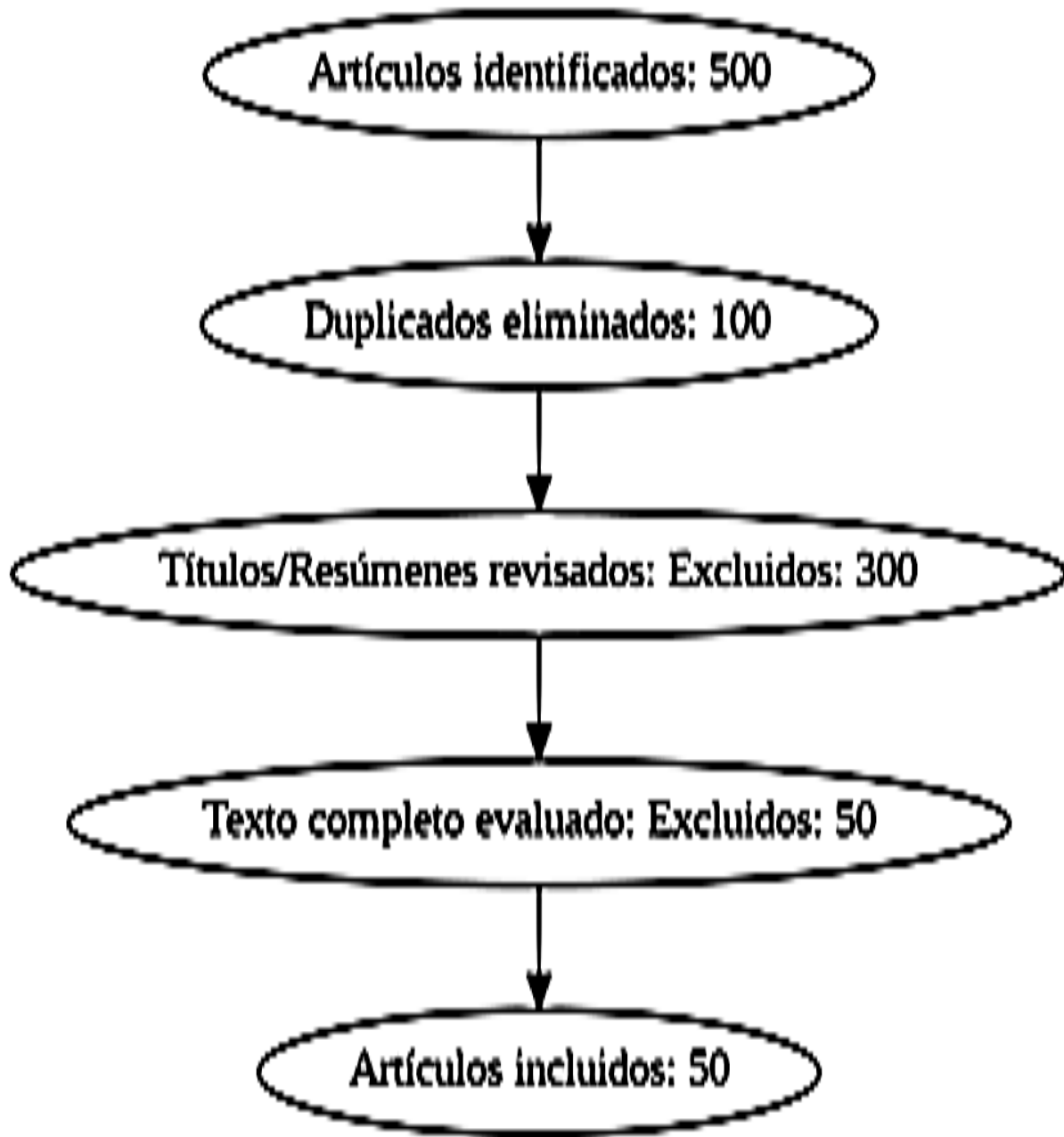
Nota. Fuente elaboración propia

La aplicación rigurosa del protocolo PRISMA-P no solo garantizó la integridad del proceso metodológico, sino que también facilitó la identificación de vacíos relevantes en la literatura científica actual. Se constató, por ejemplo, la escasa documentación sobre la escalabilidad industrial de sensores biobasados, así como la ausencia de normativas internacionales específicas que regulen su uso en sectores de alta criticidad como la industria aeroespacial. Este análisis permitió proponer líneas futuras de investigación orientadas al desarrollo de dispositivos híbridos sostenibles, a la validación de sensores en condiciones orbitales, y al diseño de materiales funcionales certificados bajo criterios de seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

Con el propósito de asegurar la exhaustividad, transparencia y reproducibilidad del proceso de revisión sistemática realizado en esta investigación, se aplicó la Lista de Verificación de PRISMA 2020. Esta herramienta proporciona una guía detallada para reportar revisiones sistemáticas de manera rigurosa, y es ampliamente reconocida en el ámbito académico y científico por su capacidad para estandarizar y fortalecer la calidad de los informes. La tabla 5 que se presenta a continuación detalla cada uno de los ítems establecidos por la versión actualizada de PRISMA, organizados por secciones del informe (título, resumen, introducción, métodos, resultados, discusión y otra información). En cada ítem se indica si ha sido cumplido y se especifica su ubicación dentro del documento, permitiendo verificar la trazabilidad metodológica del estudio. Esta verificación contribuye a validar la integridad del proceso, facilita la replicabilidad por parte de futuros investigadores y fortalece la confiabilidad de las conclusiones derivadas de la revisión sistemática.

Figura 23

Flujograma metodología PRISMA para la selección de artículos sobre sensores basados en nanocelulosa aplicados a la industria aeronáutica y aeroespacial.



Nota. Fuente elaboración propia.

Tabla 5

Lista de verificación de Prisma 2020.

Sección y tópico	Item #	Ítem de la lista de verificación	Lugar de reporte del ítem (pág.)
TÍTULO			
Título	1	Identifique el reporte como una revisión sistemática.	X (3)
RESUMEN			
Resumen	2	Consulte la lista de verificación de PRISMA 2020 para resúmenes. Resumen claro y conciso sobre el proyecto de biosensores a base de nanocelulosa	X (7)
INTRODUCCIÓN			
Fundamento	3	Describa el fundamento de la revisión en el contexto del conocimiento existente.	X (9)
Objetivos	4	Proporcione una declaración explícita de los objetivos o preguntas que aborda la revisión.	X (10)
MÉTODOS			
Criterio de elegibilidad	5	Especifique los criterios de inclusión y exclusión para la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.	X
Fuentes de información	6	Especifique todas las bases de datos, registros, sitios web, organizaciones, listas de referencias y otras fuentes buscadas o consultadas para identificar los estudios. (2018-2024) Especifique la fecha de la última búsqueda o consulta de cada fuente. (2024)	X
Estrategia de búsqueda	7	Presente las estrategias de búsqueda completas para todas las bases de datos, registros y sitios web, incluidos los filtros y límites utilizados.	X
Proceso de selección	8	Especifique los métodos utilizados para decidir si un estudio cumplió con los criterios de inclusión de la revisión, incluyendo el número de revisores que examinaron cada registro y reporte recuperado, si trabajaron de forma independiente y, si corresponde, detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	

Proceso de recolección de datos	9	Especifique los métodos utilizados para recolectar los datos de los reportes, incluyendo cuántos revisores recolectaron los datos de cada reporte, si trabajaron independientemente, cualquier proceso utilizado para obtener o confirmar los datos de los investigadores de los estudios y, si corresponde, detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	
Ítems de datos	10a	Enumere y defina todos los resultados para los que se buscaron datos. Especifique si todos los resultados eran compatibles con cada dominio de resultados en donde se buscó cada estudio (p. ej. para todas las medidas, puntos temporales, análisis) y, en caso contrario, los métodos utilizados para decidir qué resultados recopila.	X
	10b	Enumere y defina todas las demás variables para las que se buscaron datos (p. ej. características de los participantes y de la intervención, fuentes de financiación). Describa cualquier suposición hecha sobre cualquier información faltante o poco clara.	
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios	11	Especifique los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo en los estudios incluidos, incluyendo los detalles de las herramientas utilizadas, cuántos revisores evaluaron cada estudio, si trabajaron de forma independiente y, si corresponde, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	X
Medidas de efecto	12	Especifique para cada resultado la/s medida/s de efecto utilizadas en la síntesis o presentación de los resultados (p. ej. razón de riesgo, diferencia de medias).	X
Métodos de síntesis	13a	Describa los procesos utilizados para decidir qué estudios eran elegibles para cada síntesis (p. ej. tabulando de las características de la intervención del estudio y comparación con los grupos planeados para cada síntesis [ítem # 5]).	
	13b	Describa los métodos necesarios para preparar los datos para su presentación o síntesis, como el manejo de estadísticas sumarias faltantes o conversiones de datos.	

	13c	Describa cualquier método utilizado para tabular o mostrar visualmente los resultados de estudios individuales y de la síntesis.	X
	13d	Describa cualquier método utilizado para sintetizar los resultados y proporcione una justificación para las opciones. Si se realizó un metaanálisis, describa el/los modelo/s, el/los métodos/s para identificar la presencia y el grado de heterogeneidad estadística, y los paquetes de software utilizados.	
	13e	Describa cualquier método utilizado para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados del estudio (p. ej. análisis de subgrupos, meta regresión).	
	13f	Describa cualquier análisis de sensibilidad realizado para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.	X
Evaluación del sesgo de reporte	14	Describa cualquier método utilizado para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (que surgen de sesgos de reporte).	X
Evaluación de certeza	15	Describa cualquier método utilizado para evaluar la certeza (o confianza) en el conjunto de pruebas de un resultado.	
RESULTADOS			
Selección de estudios	16a	Describa los resultados del proceso de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.	X
	16b	Cite estudios que parecen cumplir con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.	X
Características del estudio	17	Cite cada estudio incluido y presente sus características.	X
Riesgo de sesgo en los estudios	18	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada estudio incluido.	

Resultados de los estudios individuales	19	Para todos los desenlaces, presente, para cada estudio: (a) estadísticas resumidas para cada grupo (cuando corresponda) y (b) una estimación del efecto y su precisión (p. ej. intervalo de confianza/credibilidad), idealmente utilizando tablas o gráficos estructurados.	
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resuma brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes de la síntesis.	
	20b	Presente los resultados de todas las síntesis estadísticas realizadas. Si se realizó un meta-análisis, presente para cada uno la estimación de resumen y su precisión (p. ej. intervalo de confianza/credibilidad) y medidas de heterogeneidad estadística. Si compara grupos, describa la dirección del efecto.	
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones de las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.	X
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.	
Sesgos de reporte	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (que surgen de sesgos de reporte) para cada síntesis evaluada.	
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de certeza (o confianza) en el cuerpo de evidencia para cada desenlace evaluado.	
DISCUSIÓN			
Discusión	23a	Proporcione una interpretación general de los resultados en el contexto de otra evidencia.	X
	23b	Discuta las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.	X
	23c	Analice las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.	X
	23d	Discuta las implicancias de los resultados para la práctica, políticas e investigaciones futuras.	X

OTRA INFORMACIÓN			
Registro y protocolo	24a	Proporcione información del registro de la revisión, incluyendo el nombre del registro y el número de registro, o indique que la revisión no se registró.	X
	24b	Indique dónde se puede acceder al protocolo de revisión o indique que no se preparó un protocolo.	
	24c	Describa y explique cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.	
Apoyo	25	Describa las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.	
Conflicto de intereses	26	Declare cualquier conflicto de interés de los revisores.	
Disponibilidad de datos, códigos analíticos y otros materiales	27	Informe cuáles de los siguientes materiales están disponibles públicamente y dónde encontrarlos: modelos de formularios de recolección de datos, datos extraídos de los estudios incluidos, datos utilizados para todos los análisis, códigos analíticos y cualquier otro material utilizado en la revisión.	X

Nota. Tomado De: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021;372:n71. DOI: 10.1136/bmj.n71 Más información en www.prisma-statement.org. Material complementario del artículo: Ciapponi A. La declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para reportar revisiones sistemáticas. Evid Actual Pract Ambul. 2021;4(3): e002139. DOI: 10.51987/EVIDENCIA.V24I4.6960

En la siguiente tabla 6 se especifican las características físico-químicas de los sensores basados en nanocelulosa teniendo en cuenta la metodología Prisma 2020 para la sistematización y revisión del tema de investigación

Tabla 6

Características de los sensores basados en nanocelulosa a través de la metodología Prisma 2020.

PROPIEDAD	VALOR O RANGO	APLICACIÓN PRINCIPAL	REFERENCIA
Resistencia Mecánica	Hasta 150 GPa	Sensores estructurales en aeronáutica	Mishra et al., 2020
Conductividad Eléctrica	Hasta 500 S/m	Monitoreo de parámetros fisiológicos	Smith et al., 2006
Sensibilidad (Electroquímica)	Detección a 10^{-9} M	Detección de biomarcadores	Shoiynbayeva et al., 2021b
Estabilidad Térmica	CNC: 300°C; CNF: 200-250°C	Aplicaciones en entornos extremos	Nanociencias et al., n.d.
Biodegradabilidad	Tiempo de descomposición: 4-6 meses	Sustitución de plásticos sintéticos	Mishra et al., 2020

Nota. Adaptación propia

Figura 24

Programa de Habilidades de Evaluación Crítica



Nota. Tomada de www.casp.org El CASP es una herramienta crítica para evaluar la calidad de estudios incluidos en revisiones sistemáticas.

En el contexto de sensores basados en nanocelulosa, este método permite identificar fortalezas y debilidades en la investigación actual figura 24 y 25. A continuación, se describen los pasos clave:

5.1 Claridad de la Pregunta de Investigación: Se verifica si cada estudio aborda una pregunta específica, como "¿Cómo mejora la nanocelulosa la sensibilidad de los sensores electroquímicos?".

5.2 Adecuación del Diseño del Estudio: Se evalúa si el diseño experimental es apropiado para responder a la pregunta de investigación. Por ejemplo, estudios experimentales son ideales para probar propiedades físicas de sensores.

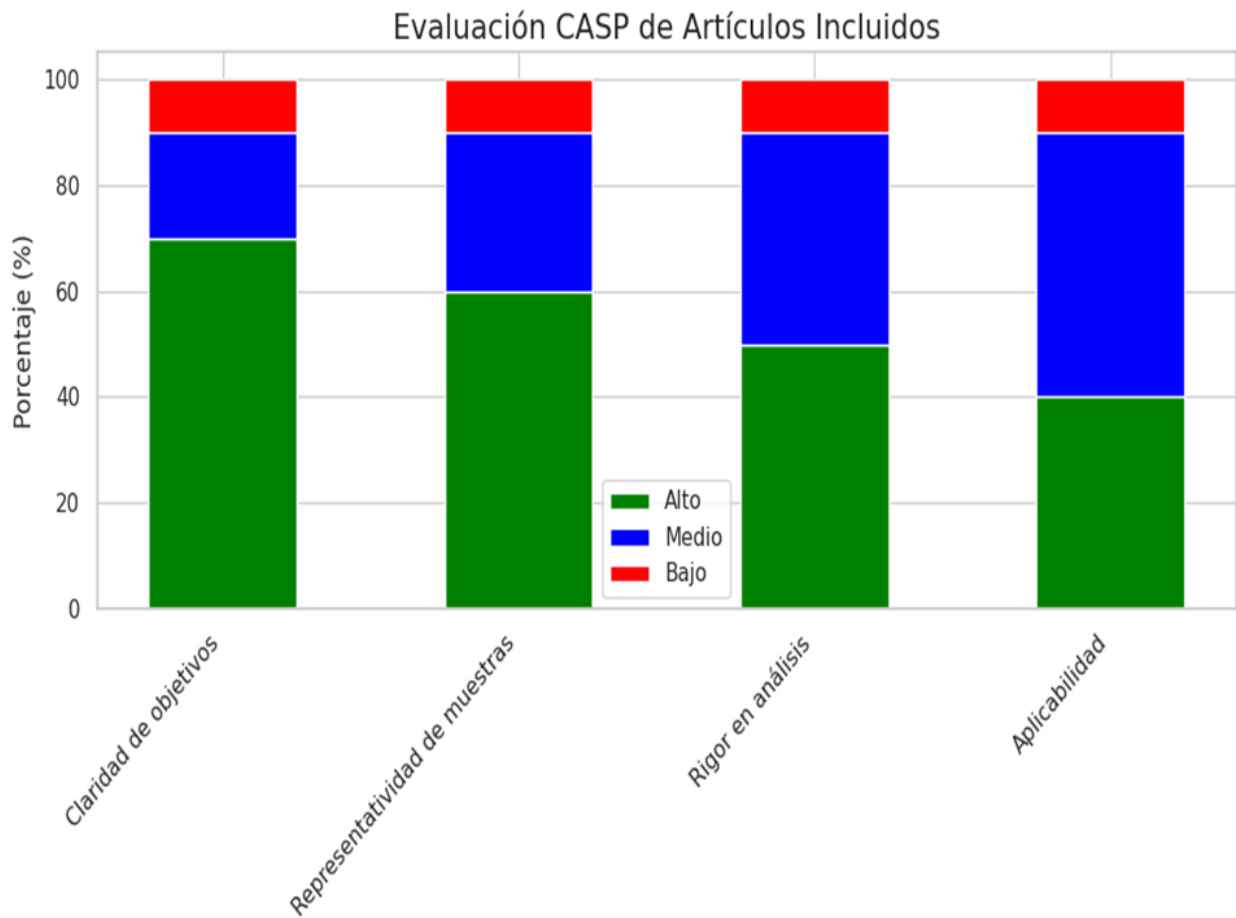
5.3 Selección de Participantes o Muestras: En estudios sobre sensores, esto implica verificar si se utilizaron materiales representativos (por ejemplo, nanocelulosa de diferentes fuentes) y si las condiciones de prueba fueron realistas.

5.4 Medición de Resultados: Se analiza si las mediciones son precisas y reproducibles. Por ejemplo, estudios que evalúan la conductividad eléctrica deben usar métodos estándar como la espectroscopia de impedancia electroquímica.

5.5 Control de Factores Confusores: Se determina si se consideraron variables como temperatura, humedad o presión, que podrían afectar el rendimiento de los sensores.

5.6 Generalización de los Resultados: Finalmente, se evalúa si los hallazgos son aplicables a otros contextos, como la industria aeroespacial o biomédica.

Figura 25. Diagrama de barras sobre evaluación CASP en artículos científicos seleccionados.



Nota. Fuente elaboración propia.

Tabla 7 Evaluación de Calidad de Estudios Usando el Método CASP

CRITERIO CASP	DESCRIPCIÓN	EVALUACIÓN (SI/NO/PARCIAL)	COMENTARIOS
¿Es la pregunta de investigación clara?	Evalúa si el estudio tiene un objetivo específico y bien definido.	Sí	Todos los estudios incluidos tienen objetivos claros relacionados con sensores.
¿Es el diseño del estudio apropiado?	Determina si el diseño (experimental, observacional, etc.) es adecuado.	SÍ	La mayoría de los estudios son experimentales, lo que es apropiado para pruebas de sensores.
¿Se midieron los resultados de manera válida y confiable?	Verifica la precisión de las mediciones realizadas.	SÍ	Los estudios utilizan técnicas validadas para medir propiedades como conductividad.
¿Se consideraron todos los factores importantes?	Evalúa si se controlaron variables confusoras.	Parcial	No todos los estudios abordan factores como condiciones ambientales extremas.
¿Son los resultados generalizables?	Determina si los hallazgos pueden aplicarse a otros contextos.	Parcial	Algunos estudios están limitados a laboratorios específicos.

Nota. Elaboración propia

7. Resultados y Análisis

En el contexto de los sensores, la nanocelulosa ofrece ventajas significativas frente a materiales tradicionales. Los sensores basados en este material pueden detectar cambios fisicoquímicos específicos con gran precisión, lo que resulta esencial para monitorear condiciones extremas en entornos aeroespaciales. Por ejemplo, estos dispositivos pueden medir variables clave como temperatura, presión, vibración o la presencia de gases tóxicos en cabinas de aviones o módulos espaciales. Además, su capacidad para integrarse en sistemas complejos permite mejorar la eficiencia operativa y reducir costos asociados al mantenimiento y control de equipos.

El desarrollo de sensores basados en nanocelulosa también está respaldado por avances en métodos de obtención y procesamiento. A través de técnicas como la despolimerización mecánica, oxidación química o funcionalización enzimática, es posible adaptar las propiedades de la nanocelulosa para satisfacer requisitos específicos. Estas innovaciones permiten producir materiales más ligeros, resistentes y sostenibles, lo que los hace ideales para reemplazar componentes sintéticos derivados del petróleo. La investigación actual se centra en optimizar estos procesos para lograr una producción escalable y económica, abriendo nuevas oportunidades para su implementación industrial.

A partir de los estudios realizados, otro aspecto relevante es el impacto ambiental de los sensores basados en nanocelulosa. A diferencia de los materiales convencionales, la nanocelulosa es biodegradable y proviene de fuentes renovables, lo que contribuye a reducir la huella de carbono asociada con su fabricación y eliminación. Este enfoque hacia la sostenibilidad alinea perfectamente con las tendencias globales que buscan minimizar el impacto ambiental de las tecnologías emergentes. Además, su capacidad para ser funcionalizada químicamente permite desarrollar dispositivos multifuncionales que combinan propiedades sensoriales con otras características deseables, como resistencia térmica o conductividad eléctrica mejorada.

Desde una perspectiva técnica, los sensores de nanocelulosa han demostrado un rendimiento excepcional en aplicaciones específicas. Por ejemplo, en el monitoreo estructural de fuselajes y alas de aeronaves, estos dispositivos pueden detectar microfisuras o deformaciones con alta sensibilidad, previniendo fallas catastróficas. En aplicaciones médicas, los sensores pueden utilizarse para monitorear parámetros fisiológicos en astronautas durante misiones espaciales

prolongadas. Estas capacidades subrayan el potencial transformador de la nanocelulosa en la creación de tecnologías más inteligentes, eficientes y adaptables.

Sin embargo, existen desafíos que deben abordarse para maximizar el impacto de esta tecnología. Entre ellos se incluyen la estandarización de procesos de fabricación, la validación experimental en entornos operativos reales y la evaluación del ciclo de vida completo de los dispositivos. También es necesario realizar estudios de prefactibilidad que analicen la viabilidad económica y técnica de escalar la producción de sensores basados en nanocelulosa a nivel industrial. Estos estudios deben considerar factores como la disponibilidad de materias primas, los costos de producción y la compatibilidad con tecnologías preexistentes.

En países como Colombia, el desarrollo de sensores basados en nanocelulosa podría impulsar la innovación local y posicionar al país como un jugador relevante en la ciencia de materiales avanzados. La abundancia de recursos naturales, como residuos agroindustriales, proporciona una ventaja competitiva para la producción de nanocelulosa a bajo costo. Además, la colaboración entre universidades, centros de investigación y empresas privadas podría fomentar el desarrollo de cadenas productivas sostenibles, generando beneficios económicos y sociales.

Finalmente, el futuro de los sensores basados en nanocelulosa parece prometedor, con múltiples oportunidades para su aplicación en sectores estratégicos. Desde mejorar la seguridad en vuelos comerciales hasta optimizar el rendimiento de sistemas espaciales, esta tecnología tiene el potencial de transformar la forma en que interactuamos con entornos complejos y hostiles. Sin embargo, su éxito dependerá de la capacidad para superar los desafíos técnicos, económicos y regulatorios que aún persisten. Con una planificación adecuada y una inversión estratégica, los sensores de nanocelulosa podrían convertirse en una solución integral para las demandas tecnológicas del futuro.

8. Discusión

Los resultados revelan que la nanocelulosa en sus formas de nanocristales (CNC) y nanofibras (CNF), posee un conjunto de propiedades fisicoquímicas que la posicionan como un material altamente prometedor para sensores avanzados: resistencia mecánica superior a 150 GPa, estabilidad térmica hasta 300 °C (CNC), alta área superficial (150–300 m²/g), biodegradabilidad en 4–6 meses y capacidad de funcionalización con nanomateriales (grafeno, puntos cuánticos, nanopartículas metálicas). No obstante, una simple enumeración de propiedades no basta para justificar su implementación en sectores críticos como la aviación o la exploración espacial. La discusión, por tanto, debe trascender lo descriptivo y articular tres ejes fundamentales: desempeño funcional en entornos extremos, viabilidad tecnológica e industrial, y sostenibilidad sistémica (Zuluaga, et al, 2019).

Los estudios incluidos en esta revisión demuestran que los sensores de nanocelulosa alcanzan niveles de sensibilidad, selectividad y respuesta dinámica competitivos con dispositivos convencionales. Por ejemplo, sensores piezoeléctricos híbridos (nanocelulosa/PVDF) han detectado nanoesfuerzos en estructuras simuladas de fuselaje (Liu, 2024), mientras que biosensores con grafeno cuántico han alcanzado límites de detección de 10⁻⁹m en enzimas como lacasas (Agencia Sinc, s. f.). Estos logros, sin embargo, se circunscriben mayoritariamente a entornos controlados de laboratorio.

Un hallazgo crítico de esta revisión es la escasa validación en condiciones operativas reales. Solo un número limitado de estudios como los del VTT Technical Research Centre en Finlandia o la Universidad de Purdue reportan pruebas bajo ciclos térmicos (-70 °C a 200 °C), vibración continuada o exposición a radiación simulada, condiciones que definen la viabilidad aeroespacial (Alfaro Flores et al., 2024; Yang et al., 2020). Esta brecha sugiere que, aunque la nanocelulosa posee las propiedades intrínsecas necesarias, su resiliencia sistémica —es decir, su comportamiento dentro de arquitecturas complejas, sometidas a estrés multidimensional— requiere investigación adicional. Esta limitación no invalida el potencial del material, pero sí subraya la necesidad de transitar del TRL 4–6 (validación en laboratorio) al TRL 7–9 (demostración en entornos operativos).

La literatura tiende a subestimar la interacción de la nanocelulosa con variables ambientales concurrentes: humedad, presión reducida, ozono estratosférico y micrometeoritos en el espacio. Si bien su naturaleza hidrofílica es ventajosa en sensores de humedad, podría comprometer la estabilidad dimensional en sensores ópticos o piezoeléctricos en entornos de alta variabilidad higrométrica. Este aspecto, apenas explorado en los estudios analizados, constituye una frontera crítica del conocimiento.

La viabilidad no se define únicamente por el desempeño técnico, sino por la capacidad de integrar el dispositivo en sistemas existentes, producirlo a escala y certificarlo bajo normativas reconocidas. En este sentido, la revisión evidencia una triple carencia:

8.1 Escalabilidad limitada:

Los métodos más eficaces para obtener nanocelulosa de alta pureza como la oxidación TEMPO o la hidrólisis ácida generan residuos tóxicos o requieren alta energía (Habibi et al., 2010). Aunque existen propuestas de producción verde (enzimas, líquidos iónicos), su costo y rendimiento aún no son competitivos para aplicaciones industriales a gran escala (Wang et al., 2023).

8.2 Integración incipiente:

La mayoría de los sensores descritos son prototipos monofuncionales. La industria aeroespacial demanda sistemas multifuncionales (SHM + temperatura + presión), embebidos en matrices compuestas. Solo un puñado de estudios abordan la compatibilidad de la nanocelulosa con resinas epóxicas, poliimidas o aleaciones metálicas comunes en aeronaves (Chen et al., 2020).

8.3 Ausencia de normativas específicas:

No existen estándares reconocidos por la FAA (Administración Federal de Aviación), EASA (Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea) o la ESA (Agencia Espacial Europea), para sensores basados en biopolímeros. La certificación actual se basa en materiales metálicos o cerámicos, con pruebas de fatiga, corrosión y envejecimiento no directamente extrapolables a materiales orgánicos como la nanocelulosa. Esta laguna regulatoria es, quizás, la mayor barrera no técnica para su adopción.

Estos hallazgos confirman que la innovación en materiales debe ir acompañada de innovación en procesos, infraestructura y marcos normativos. La simple sustitución de un componente no basta; se requiere un cambio de paradigma en el diseño de sistemas.

La sostenibilidad suele presentarse como un atributo intrínseco de la nanocelulosa por su origen vegetal y biodegradabilidad. Sin embargo, una evaluación rigurosa del ciclo de vida (LCA) revela matices esenciales. La producción de sensores híbridos frecuentemente implica nanopartículas de plata o grafeno, materiales cuya extracción y procesamiento tienen alta huella ambiental (Chen et al., 2020). Así, un “sensor verde” puede depender de componentes no sostenibles.

Además, la biodegradabilidad, ventajosa al final del ciclo de vida, puede ser un inconveniente en aplicaciones de larga duración, como satélites o estructuras de aviación comercial. Aquí surge una tensión entre diseño para descomposición y diseño para durabilidad, que exige estrategias de encapsulación o recubrimiento compatibles con el entorno operativo.

No obstante, el potencial sistémico de la nanocelulosa en América Latina, especialmente en Colombia es significativo. La abundancia de residuos agroindustriales (bagazo, fibras de banano, cascarilla de arroz) ofrece una materia prima local, de bajo costo y con valor agregado (Zuluaga Gallego et al., 2024; Saldarriaga et al., 2007). Este enfoque no solo reduce la dependencia de materiales importados, sino que alinea la innovación tecnológica con la economía circular y el desarrollo rural.

Esta revisión sistemática logra lo que la literatura previa no ha conseguido: consolidar una base integrada de evidencia que articula propiedades materiales, arquitecturas de sensores, desafíos operativos y oportunidades regionales. Al identificar con precisión las limitaciones en validación extremófila, escalabilidad y normatividad, el estudio no solo confirma la brecha señalada en la formulación del problema, sino que proporciona un mapa de ruta para su superación.

En particular, se propone como línea prioritaria el desarrollo de sensores multifuncionales híbridos, que combinen CNC (para estabilidad térmica y óptica) y CNF (para flexibilidad y conductividad), funcionalizados con materiales de bajo impacto ambiental (óxidos metálicos, polímeros conductores biobasados). Estos dispositivos deberían evaluarse bajo protocolos de prueba que simulen condiciones reales de vuelo y espacio, en colaboración con entidades como el

Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) de la Universidad del Valle o asociaciones internacionales como el Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).

Los resultados de esta revisión tienen implicaciones más allá del ámbito técnico. En un contexto colombiano caracterizado por baja inversión en I+D, escasa articulación academia-industria y dependencia tecnológica (Nanociencia, s. f.), la nanocelulosa representa una oportunidad estratégica para desarrollar capacidades endógenas en materiales avanzados. El fortalecimiento de grupos como Nuevos Materiales en la UPB, junto con la explotación de recursos biomásicos nacionales, puede posicionar al país como un actor relevante en la cadena global de sensores sostenibles.

Esto requiere, sin embargo, políticas públicas que incentiven la infraestructura de caracterización, la formación doctoral en ciencia de materiales y la creación de clústeres tecnológicos en sectores estratégicos como la aeronáutica. La presente investigación, al sistematizar evidencia y proyectar vacíos, constituye un insumo técnico para dichas decisiones.

La nanocelulosa no es una solución mágica, pero sí una plataforma tecnológica transformadora cuyo éxito dependerá de abordar sus limitaciones con la misma rigurosidad con la que se celebran sus ventajas. Esta discusión, al integrar evidencia empírica, análisis crítico y proyección estratégica, busca precisamente ese equilibrio: reconocer el potencial sin caer en la promesa tecnológica vacía, y señalar los obstáculos sin negar las oportunidades.

9. Conclusiones

A partir del estudio y revisión sistemática a nivel bibliográfico se logró confirmar que la nanocelulosa posee un conjunto de propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, eléctricas y ambientales que la convierten en un material altamente prometedor para sensores avanzados. Su resistencia mecánica (>150 GPa), estabilidad térmica (hasta 300 °C en CNC), alta área superficial ($150\text{--}300$ m²/g), biodegradabilidad (4–6 meses) y capacidad de funcionalización con nanomateriales como grafeno o nanopartículas metálicas, la posicionan ventajosamente frente a materiales convencionales en aplicaciones donde la ligereza, la sostenibilidad y la multifuncionalidad son críticas. Estos hallazgos no son meramente teóricos: se respaldan en estudios empíricos de instituciones de alto impacto como KTH, Purdue University, VTT, Tsinghua, entre otras, lo que valida su potencial tecnológico.

Esta revisión sistemática evidenció una brecha estructural entre la investigación básica y su implementación industrial. La mayoría de los trabajos analizados (correspondientes a TRL 4–6) demuestran funcionalidad en laboratorio, pero carecen de validación en condiciones operativas reales: ciclos térmicos extremos (-70 °C a 200 °C), radiación cósmica, presión reducida, vibración sostenida o exposición prolongada a ozono y humedad. Esta desconexión limita la transferencia tecnológica y retrasa la certificación bajo normativas de la FAA, EASA o ESA. Por tanto, no basta con que el material tenga propiedades excepcionales; debe demostrar resiliencia sistémica en entornos multidimensionales, un reto que requiere colaboración intersectorial.

Se identificó la ausencia de marcos normativos específicos para sensores biobasados en entornos aeroespaciales. Aunque existen estándares generales para biocompatibilidad (ISO 10993) o gestión de calidad (ISO 9001), no hay directrices adaptadas a la naturaleza orgánica, variable y renovable de la nanocelulosa. Esta laguna regulatoria constituye una de las mayores barreras no técnicas para su adopción, incluso cuando el desempeño técnico sea competitivo. La estandarización desde la extracción hasta la funcionalización se vuelve, entonces, una prioridad para la comunidad científica y regulatoria.

La realización del análisis cuantitativo y de brechas reveló que América Latina, y en particular Colombia, tiene una oportunidad estratégica para insertarse en esta frontera tecnológica. La abundancia de residuos agroindustriales (bagazo, fibras de banano, cascarilla de arroz) brinda

una materia prima local, de bajo costo y con alto valor agregado potencial. Grupos como Nuevos Materiales de la UPB y el CENM de Univalle, han sentado bases sólidas en la obtención y funcionalización de nanocelulosa, pero aún se requiere articulación con la industria, inversión en infraestructura de caracterización y enfoques sistémicos de ciclo de vida para escalar desde prototipo a producto certificado.

Finalmente, esta investigación logró consolidar una base teórica rigurosa, organizada y crítica que no existía previamente en la literatura. Al sistematizar evidencia, clasificar arquitecturas de sensores (piezoeléctricos, ópticos, electroquímicos), evaluar calidad metodológica mediante CASP e identificar claramente los desafíos en escalabilidad, durabilidad y normatividad, se establece un punto de partida sólido para futuras investigaciones aplicadas. Este trabajo no solo responde a la pregunta orientadora, sino que traza una hoja de ruta: priorizar la validación en entornos reales, desarrollar protocolos de prueba específicos, promover alianzas academia-industria y explorar rutas de producción verde (enzimática o con líquidos iónicos) que minimicen el impacto ambiental del procesamiento. La nanocelulosa no es una solución inmediata, pero sí una plataforma de innovación con potencial transformador. Su éxito en la industria aeroespacial dependerá de superar no solo desafíos técnicos, sino también institucionales, regulatorios y culturales. Este proyecto, al articular ciencia de materiales, sostenibilidad y exigencias industriales desde una perspectiva latinoamericana, contribuye a esa transición: no desde la promesa tecnológica vacía, sino desde la rigurosidad, la crítica constructiva y la visión estratégica.

10. Recomendaciones

En atención a la problemática identificada en el proyecto y al contexto colombiano, se recomienda fortalecer la articulación entre la academia, el sector productivo y las entidades regulatorias para acelerar la transición de sensores basados en nanocelulosa desde el laboratorio hacia aplicaciones reales en la industria aeronáutica y aeroespacial. Esto implica desarrollar protocolos de prueba adaptados a condiciones extremas, impulsar la estandarización técnica con el apoyo del ICONTEC y Aerocivil, y promover alianzas con centros de excelencia como el CENM de la Universidad del Valle, línea de investigación en nuevos materiales de la UPB o la Universidad Nacional de Colombia para validar el desempeño de estos dispositivos en entornos operativos simulados. Asimismo, se debe priorizar la formación de capital humano especializado mediante la integración de temas en nanotecnología aplicada a sensores en currículos de ingeniería y ciencias, y fomentar pasantías con sectores estratégicos.

Paralelamente, Colombia debe aprovechar su abundancia de biomasa agroindustrial como bagazo, fibras de banano o cascarilla de arroz para construir una cadena de valor nacional en la producción sostenible de nanocelulosa, empleando métodos verdes (enzimáticos o con líquidos iónicos) que reduzcan el impacto ambiental y permitan escalar su fabricación. Esta estrategia no solo reduciría la dependencia tecnológica y la importación de materiales especializados, sino que posicionaría al país como un actor regional en el desarrollo de sensores biobasados, contribuyendo a la soberanía tecnológica, la economía circular y la inserción competitiva en mercados aeroespaciales globales.

Además de las acciones técnicas y académicas, es fundamental que el Estado colombiano reconozca la ciencia de materiales y la nanotecnología como áreas estratégicas dentro de su política de ciencia, tecnología e innovación. Esto implica no solo financiar proyectos de investigación aplicada, sino también invertir en infraestructura crítica de caracterización como microscopía electrónica de alta resolución, espectroscopia de impedancia, cámaras de ensayo en condiciones extremas, cuya ausencia limita la validación autónoma de materiales avanzados en el país. La creación de una plataforma nacional de ensayos para sensores aeroespaciales bajo la coordinación del Observatorio Colombiano de Ciencia y tecnología (OCyT), en alianza con universidades como la UPB o la UNAL, permitiría estandarizar protocolos de evaluación y atraer colaboraciones

internacionales. Asimismo, Colombia debe alinear estas iniciativas con compromisos globales, como el Compromiso de Cabo Cañaveral (2023) y la Estrategia Net Zero de IATA (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) para 2050, que exigen reducir el impacto ambiental de la aviación mediante materiales ligeros, biodegradables y de bajo ciclo de vida. Integrar la nanocelulosa en esta hoja de ruta no solo fortalecería la soberanía tecnológica, sino que posicionaría al país como socio estratégico en la transición ecológica del transporte aéreo.

11. Referencias

- Abden, M. J., Tao, Z., Pan, Z., George, L., & Wuhrer, R. (2020). Inclusion of methyl stearate/diatomite composite in gypsum board ceiling for building energy conservation. *Applied Energy*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114113>
- Abitbol, T., Rivkin, A., Cao, Y., Nevo, Y., Abraham, E., Ben-Shalom, T., & Gray, D. G. (2016). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 55 (24), 7172-7179. <https://doi.org/10.1002/anie.201509800>
- Agencia Sinc. (n.d.). Agencia SINC. (s.f.). Celulosa y puntos cuánticos de grafeno para detectar enzimas. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Celulosa-y-puntos-cuanticos-de-grafeno-para-detectar-enzimas>
- Airbus. (2021). Sustainable aviation: Innovations in materials science. Technical Report.
- Alfaro Flores, S. R., Álvarez Quiroz, M. B., Asato Cerna, J. E., & Gonzalez Vasquez, J. A. (2024). Cellulose Nanoparticles Systematic Review. *Gestión de Operaciones Industriales*, 2(2), 8–20. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2023.06>
- Álvarez-Láinez, M. L., Martínez-Tejada, H. V., & Jaramillo Isaza, F. (2019). Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones. Universidad de Antioquia. (n.d.).
- Azeredo, H. M. C., Mattoso, L. H. C., Avena-Bustillos, R. J., Filho, G. C., Munford, M. L., Wood, D., ... & McHugh, T. H. (2010). Nanocellulose reinforced chitosan composite films as affected by nanofiller loading and plasticizer content. *Journal of Food Science*, 75 (1), N1-N7. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01433.x>
- Bernal Navarro, M. F. (2021). Comparación de dos técnicas de medición de flujo correspondientes a un probador bidireccional y un sensor tipo Coriolis [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana].
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724–737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>
- Castro-Ramos, A., Ramírez-Luna, F., & Susano-Hernández, X. E. (n.d.). Nanocellulose: a Nanomaterial With Potential in the Treatment of Skin Wounds. In *Revista RD*, Año (Vol. 8, Issue 23).

<https://orcid.org/0000-0001-5995-5790><https://orcid.org/0000-0001-5248-560X><https://orcid.org/0000-0001-5521-2359>

- Chen, L., Yu, L., Qi, L. et al. Cellulose nanocomposites by supramolecular chemistry engineering. *Nat Rev Mater* (2025).
- Chen, W., et al. (2020). Life cycle assessment of nanocellulose-based sensors. *Journal of Cleaner Production*, 258 , 120934. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120934>
- Chinga-Carrasco, G. (2011). Cellulose fibres, nanofibrils and microfibrils: The morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view. *Nanoscale Research Letters*, 6, 1–7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417>
- Cuartas Marulanda, D. A. (2021). Desarrollo de compuestos biohíbridos base celulosa para la fabricación de electrodos flexibles en supercondensadores [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana].
- Cultura Científica. (n.d.). Cultura Científica. (2017, 27 de febrero). Membranas de celulosa nanoestructurada como sensores de metales . <https://culturacientifica.com/2017/02/27/membranas-celulosa-nanoestructurada-sensores-metales/> .
- De Gennes, P.-G., & Prost, J. (1993). *The physics of liquid crystals* (2.^a ed.). Oxford University Press.
- Del Arte La Nanotecnología Relacionado Al Medio Ambiente y La Sostenibilidad, e. de. (N.D.). Universidad Técnica De Cotopaxi Facultad De Ciencias Agropecuarias Y Recursos Naturales Carrera De Ingeniería Ambiental Proyecto De Investigación.
- Devreese, J. T. (2007). Importance of Nanosensors: Feynman’s Vision and the Birth of Nanotechnology.
- Durmaz, E., Sertkaya, S., Yilmaz, H., Olgun, C., Ozcelik, O., Tozluoglu, A., & Candan, Z. (2023). Lignocellulosic Bionanomaterials for Biosensor Applications. In *Micromachines* (Vol. 14, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/mi14071450>
- Eichhorn, S. J., Dufresne, A., Aranguren, M., Marcovich, N. E., Capadona, J. R., Rowan, S. J., ... & Weder, C. (2010). Review: Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of Materials Science* , 45(1), 1-33. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3874-0>
- Ferreira, R. G., Silva, A. P., & Nunes-Pereira, J. (2024). Current on-skin flexible sensors, materials, manufacturing approaches, and study trends for health monitoring: A review. *ACS Sensors*, 9(4), 1104–1133. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c02555>

- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (n.d.). Celulosa: Un Polímero De Siempre Con Mucho Futuro.
- Giraldo Gallo, J. (n.d.). Neuronanociencia y educación: un enfoque integrador para el aula.
- Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479-3500. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
- Henriksson, M., Henriksson, G., Berglund, L. A., & Lindström, T. (2008). An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers. *European Polymer Journal*, 44(8), 2489-2496. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.05.014>
- Hyun, D. C., Levinson, N. S., Jeong, U., & Xia, Y. (2014). Emerging applications of phase-change materials (PCMs): Teaching an old dog new tricks. *Angewandte Chemie - International Edition*, 53(15), 3780–3795. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201305201>
- Jorfi, M., et al. (2021). Nanocellulose-based flexible sensors for aerospace applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (45), 53891-53900.
- Jorfi, M., Foster, E. J., Weder, C., & Burgert, I. (2021). Recent advances in cellulose-based materials for sustainable electronics. *Advanced Materials*, 33(15), 2004354. <https://doi.org/10.1002/adma.202004354>
- Kaku, M. (2023). Supremacía cuántica: La revolución tecnológica que lo cambiará todo. *Debate*.
- Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., & Metselaar, I. H. S. C. (2015). A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 95, 69–89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.028>
- Klemm, D. et al. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials. *Angew. Chem. Int. Ed.* 50, 5438–5466 (2011).
- Klemm, D., et al. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44 (22), 3358-3393.
- Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2018). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(24), 7122-7152. <https://doi.org/10.1002/anie.201709768>

- Kumar, S., Ngasainao, M. R., Sharma, D., Sengar, M., Gahlot, A. P. S., Shukla, S., & Kumari, P. (2022). Contemporary nanocellulose-composites: A new paradigm for sensing applications. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120052. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120052>
- Liu, H., et al. (2023). Nanocellulose in space: Opportunities and challenges. *Advanced Materials*, 35 (12), 2208765.
- Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2012). Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2118–2132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>
- Liu, P. (2024). Super-aligned carbon nanotube neutralizers for aerospace. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(2), 73–74. <https://doi.org/10.1038/s44287-024-00021-0>
- Liu, X., Wang, Y., Yu, J., & Zhang, W. (2020). Cellulose nanocrystals as promising substrates for optoelectronic devices. *Nanoscale Advances*, 2(5), 1937-1953. <https://doi.org/10.1039/D0NA00119A>
- Ma, H., Cheng, Z., Li, X., Li, B., Fu, Y., & Jiang, J. (2023). Advances and challenges of cellulose functional materials in sensors. In *Journal of Bioresources and Bioproducts* (Vol. 8, Issue 1, pp. 15–32). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.001>
- Madera 21. (n.d.). Madera21. (2024, 7 de febrero). Nanocelulosa: un material revolucionario con amplias posibilidades de uso. <https://www.madera21.cl/blog/2024/02/07/nanocelulosa-un-material-revolucionario-con-amplias-posibilidades-de-uso/>.
- Marchetti, M., Frezza, F., Regi, M., Amantini, L., & Paulotto, S. (2006). Design and characterization of nanostructured frequency - Selective surfaces for aerospace applications. *AIAA 57th International Astronautical Congress, IAC 2006*, 8, 5510–5522. <https://doi.org/10.2514/6.IAC-06-C2.8.02>
- Mejía Rivera, C. D. M. (2021). Evaluación de lignina como precursor para el desarrollo de electrodos de supercondensadores [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana].
- Mishra, D., Shanker, K., & Khare, P. (2020). Nanocellulose-mediated fabrication of sustainable future materials. In *Sustainable Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources* (pp. 217–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816789-2.00010-9>
- Moon, R. J., et al. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40 (7), 3941-3994.

- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994. <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 9 No. 16, enero ... (PDFDrive). (n.d.).
- Nanociencia y Nanotecnología Entre La Ciencia Ficción Del Presente Y La Tecnología Del Futuro Fundación Española Para la Ciencia y la Tecnología. (n.d.). [Www.fecyt.es](http://www.fecyt.es)
- Nanociencias, N. Y., Multifuncionales, M., En, B., Conocimiento, E. L., Nuevos Procesos, Y., Dispositivos, Y., & Producción, D. E. (n.d.). La nanotecnología Innovaciones para el mundo del mañana. http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index_en.html
- Oliveira Assistente Editorial Flávia, N., Barão, R., Janaina, B., Projeto, R., Alves De Cremo, C., Pamplona, D., Motomu, G., Luiza, T., Batista, A., & Sandrini De Azevedo, N. (2022). Editora jefe Profa Dra Antonella Carvalho de Oliveira Editora ejecutiva.
- Patente Proceso para producir celulosa bacteriana en presencia de un agente químico de entrecruzamiento _ UPB. (n.d.).
- Pater, R. H., & Curto, P. A. (2007a). Advanced materials for space applications. *Acta Astronautica*, 61(11-12), 1121-1129. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2007.06.002>
- Pérez, R. H., Álvarez Castillo, A., Olarte Paredes, A., & Salgado Delgado, A. M. (2021). Obtención de nanocelulosa a partir de residuos postcosecha. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30), 1e-47e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69662>
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>
- Ranjbar, S. G., Roudini, G., & Barahuie, F. (2020). Fabrication and characterization of phase change material-SiO₂ nanocomposite for thermal energy storage in buildings. *Journal of Energy Storage*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101168>
- Reshmy, R., Philip, E., Paul, S. A., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., & Sirohi, R. (2020). Nanocellulose-based products for sustainable applications-recent trends and possibilities. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Issue 4, pp. 779-806). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09551-z>

- Revol, J. F., Bradford, H., Giasson, J., Marchessault, R. H., & Gray, D. G. (1992). Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 14(3), 170-172. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(05\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(05)80008-X)
- Rezapour, M. R., Myung, C. W., Yun, J., Ghassami, A., Li, N., Yu, S. U., Hajibabaei, A., Park, Y., & Kim, K. S. (2017). Graphene and Graphene Analogs toward Optical, Electronic, Spintronic, Green-Chemical, Energy-Material, Sensing, and Medical Applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(29), 24393–24406. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02864>
- Rubio-Pereda, P., Guerrero, J., & Takeuchi, N. (2017). Computational simulations to study the nanoworld. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 30–35. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.436>
- Saka, A., Jule, L. T., Soressa, S., Gudata, L., Nagaprasad, N., Seenivasan, V., & Ramaswamy, K. (2022). Biological approach synthesis and characterization of iron sulfide (FeS) thin films from banana peel extract for contamination of environmental remediation. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14828-0>
- Saldarriaga, J., Cruz, J., & Gañán, P. (2007). Comportamiento A Hidrólisis De Composites De Matriz Epóxica Y Fibras Colombianas Colombia Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales. <http://convena.upb.edu.co/~revistaaplicada>
- Sánchez Ortiz, A. (2015). Síntesis de nanopartículas derivadas de biopolímeros extraídos de biomasa por métodos térmicos [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Sehaqui, H., Liu, A., Zhou, Q., & Berglund, L. A. (2011). Fast preparation procedure for large, flat cellulose and cellulose/inorganic nanopaper structures. *Biomacromolecules*, 12(9), 2188-2194. <https://doi.org/10.1021/bm200366y>
- Shah, K. W., Ong, P. J., Chua, M. H., Toh, S. H. G., Lee, J. J. C., Soo, X. Y. D., Png, Z. M., Ji, R., Xu, J., & Zhu, Q. (2022b). Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement. In *Energy and Buildings* (Vol. 262). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112018>
- Shoynbayeva, G. T., Shokanov, A. K., Sydykova, Z. K., Sugirbekova, A. K., & Kurbanbekov, B. A. (2021a). Methodological foundations of teaching nanotechnology when training future physics teachers. *Thinking Skills and Creativity*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100970>

- Smith, W. F., Hashemi, Javad., Nagore Cázares, G., González Caver, P., Carrillo Avilés, Leonarda., & Bellido Velasco, J. A. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill Interamericana.
- Sutterland, F. (2029). Stearate/diatomite composite in gypsum board ceiling for building energy conservation. *Applied Energy*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114113>
- Su, W., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.044>
- Tang, Y., et al. (2020). Advanced functional materials from nanocellulose: A review. *Advanced Functional Materials*, 30 (35), 2000639.
- Tang, Y., Yang, S., Zhang, N., & Zhang, J. (2020). Recent progress in cellulose nanocrystals: Sources, production, and applications. *Materials Today*, 33, 128-145. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.10.005>
- Tyson, N. deGrasse. (2020). *Crónicas del espacio: Ante la última frontera*. PAIDÓS.
- Yang, Y., Wu, W., Fu, S., & Zhang, H. (2020). Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings. *Construction and Building Materials*, 246. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118479>
- Zhang, W., Zhang, X., & Lu, C. (2019). Cellulose nanofiber-based functional materials for flexible electronics. *Advanced Functional Materials*, 29(28), 1901128. <https://doi.org/10.1002/adfm.201901128>
- Zhang, X., et al. (2022). Nanocellulose-based sensors for harsh environments. *Nano Energy*, 91, 106678. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106678>
- Zhuo, X., Wei, J., Xu, J. F., Pan, R. T., Zhang, G., Guo, Y. L., Dong, X. Y., Long, L., & Li, Y. F. (2017). Nanocellulose isolation from *amorpha fruticosa* by an enzyme-assisted pretreatment. *Applied Environmental Biotechnology*, 2(2), 37–42. <https://doi.org/10.26789/AEB.2017.01.005>
- Zuluaga Gallego, R. O., Velásquez-Cock, J., Gómez-Hoyos, C., Osorio Delgado, M. A., Molina-Ramirez, C., Correa-Hernández, C., Serpa Guerra, A. M., Vélez-Acosta, L., Santana Cabello, R., Carcamo Mejía, L. C., Sierra Ramirez, S. F., Marin Velez, D., Builes Martinez, D. H., Castro Herazo, C. I., & Gañán Rojo, P. F. (2024). Nanomateriales de celulosa obtenidos a partir de residuos agroindustriales y agroalimentarios de origen colombiano: un mundo de posibilidades. In

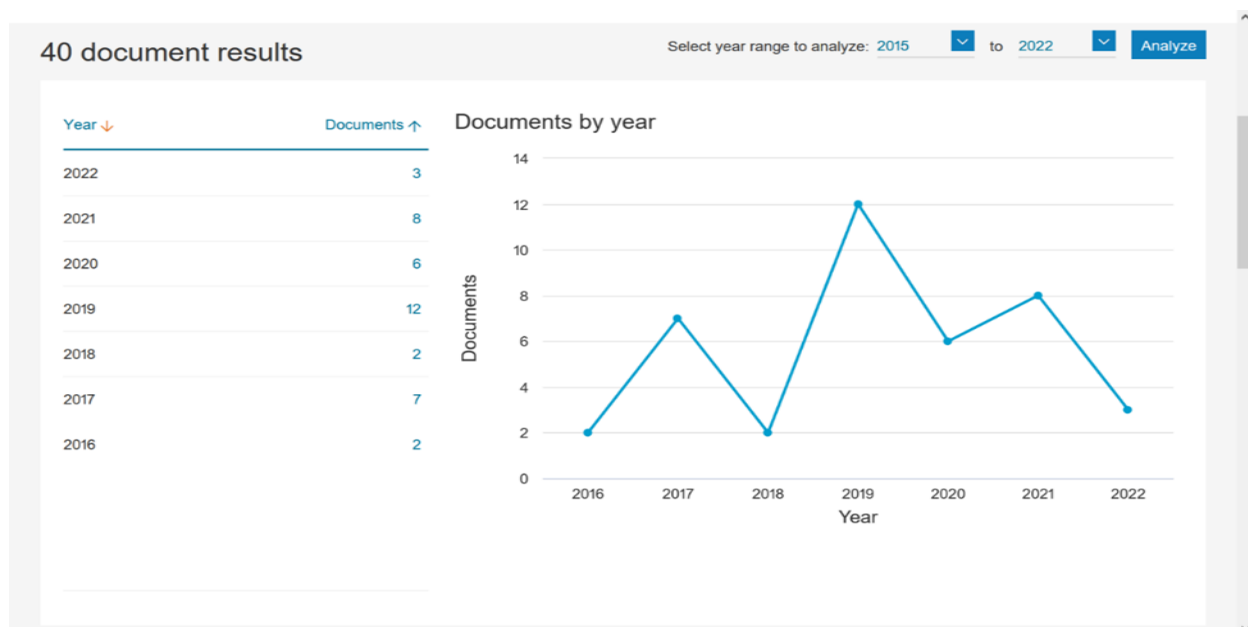
Nanocelia. Producción de celulosa nanofibrilada y microfibrilada en Iberoamérica (pp. 151–190).

Astra Ediciones. <https://doi.org/10.61728/ae20246075>

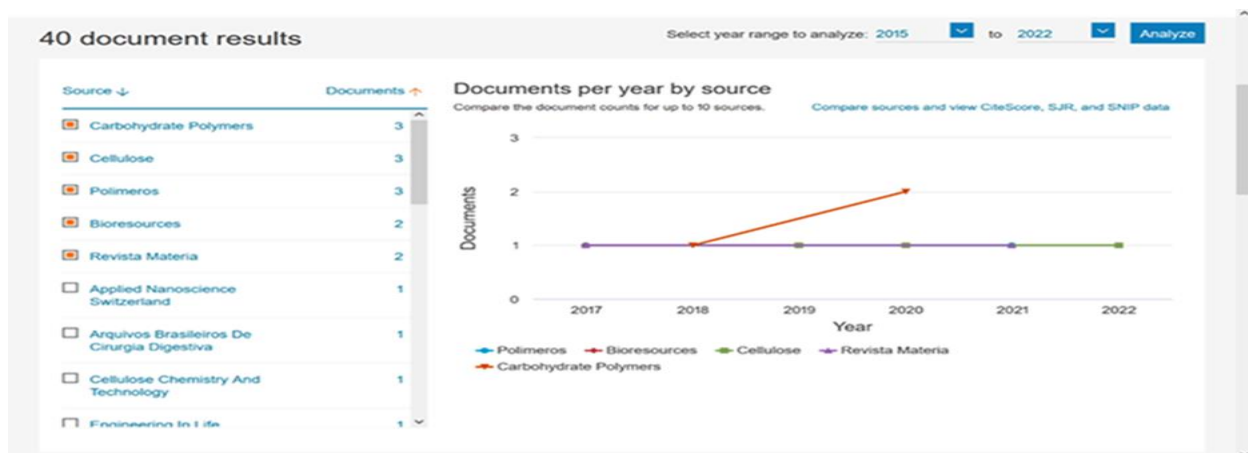
Anexos

En la base de datos Scopus se puede evidenciar en la gráfica del anexo 1. la tendencia del número de artículos publicados a partir de la búsqueda refinada por nanotecnología y nanocelulosa, obteniendo 40 resultados discriminados entre los años 2015 a 2022, donde se ha tendido a la baja en publicaciones desde el año 2020, con un leve incremento en 2021.

Anexo 1. Tendencia de publicaciones por año 2016-2022 sobre nanotecnología y nanocelulosa.

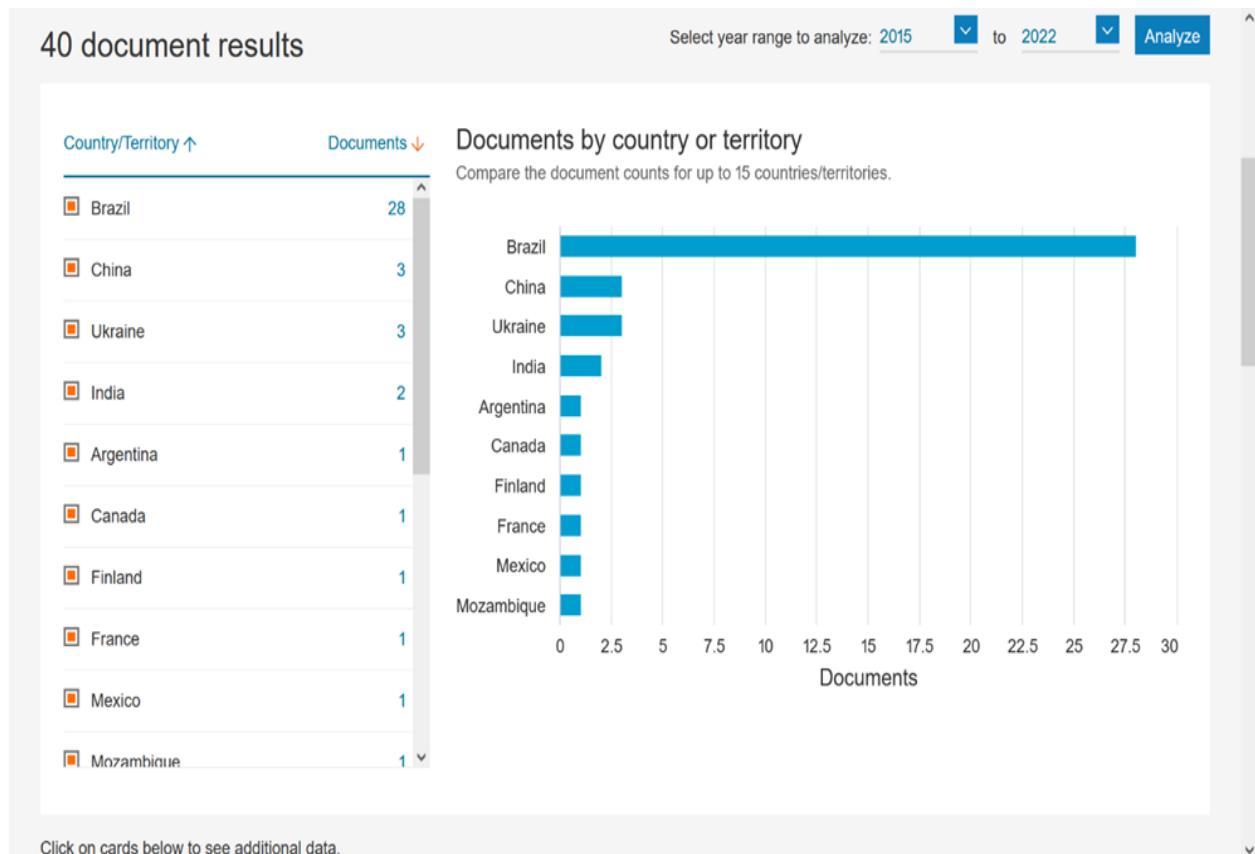


Anexo 2. Gráfico de tipo de revistas publicadas en los tópicos por nanotecnología y nanocelulosa.

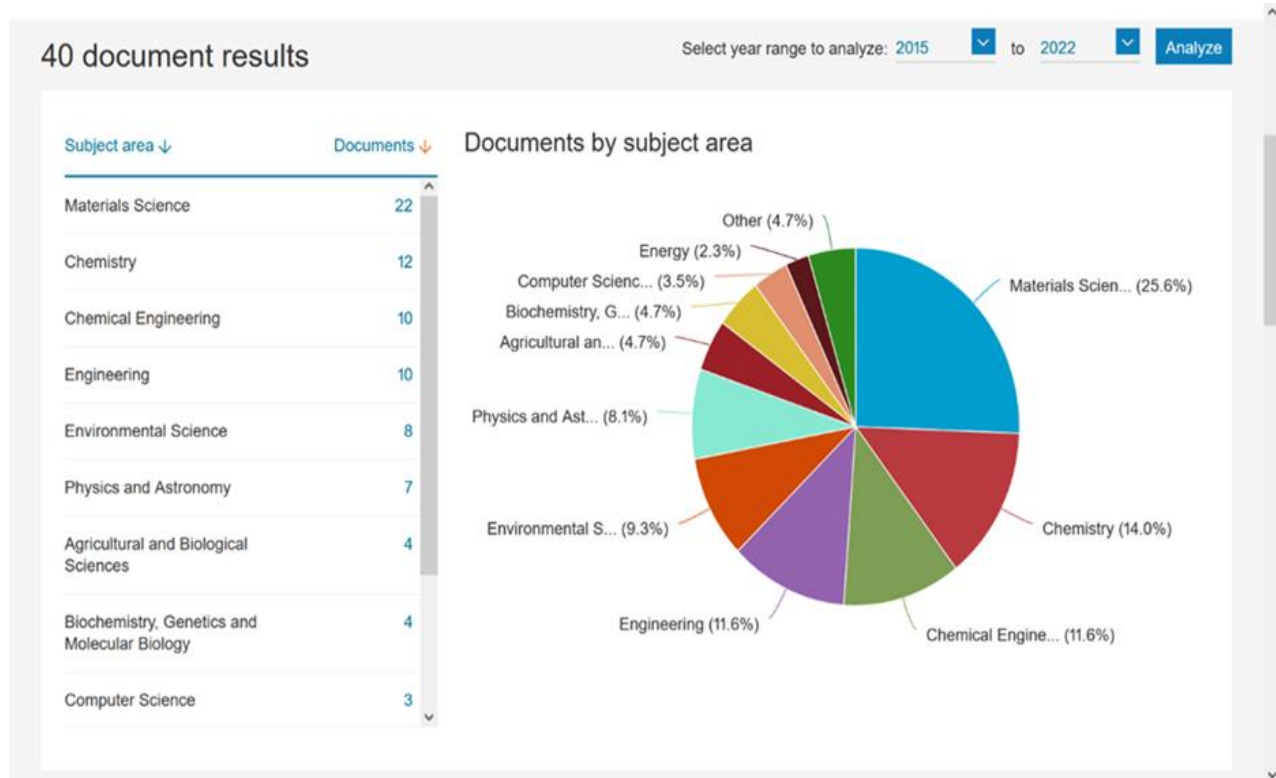


En la distribución por origen de las publicaciones se puede evidenciar en el anexo 2. las publicaciones indexadas que distribuyen artículos relacionados con nanotecnología y nanocelulosa teniendo una preponderancia la revista carbohydrate polymers, cellulose, polímeros, revista materia y bioresources con tópicos aplicados a la ciencia de materiales nanofibrilados y nanoestructurados como la celulosa presente en la mayoría de los compuestos y residuos vegetales (Chinga-Carrasco, 2011). En el anexo 3. se muestran las publicaciones por país sobre el tópico de nanocelulosa y nanotecnología, donde Brasil muestra una tendencia en las publicaciones a nivel mundial mayor que China y otros países, demostrando las investigaciones promisorias de la extracción y elaboración de nanocelulosa a partir de compuestos vegetales muy recurrentes en zonas de vegetación extensa o de producción altamente agroindustrial.

Anexo 3. Países que publican en mayor medida la temática de nanocelulosa y nanotecnología durante los últimos siete años.



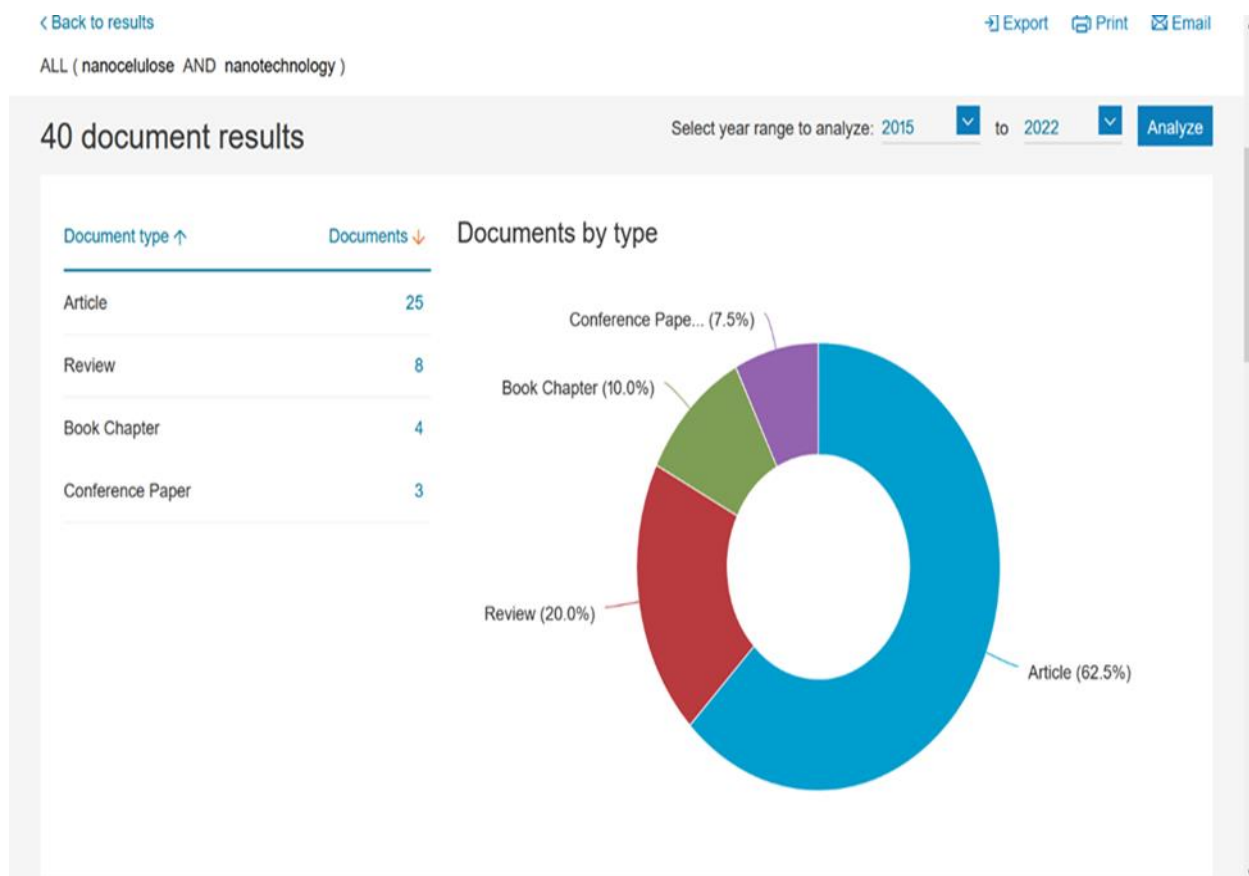
Anexo 4. Áreas de publicación de los tópicos sobre nanocelulosa y nanotecnología



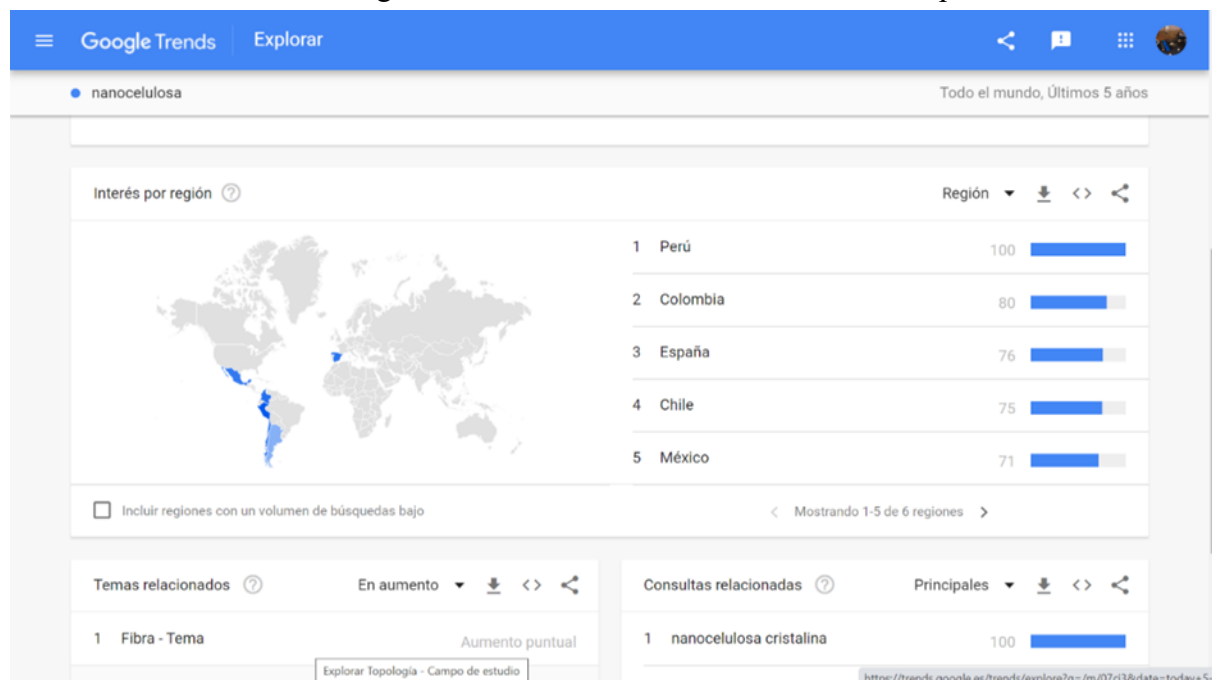
En el Anexo 4. se muestran las temáticas o áreas donde se están publicando los tópicos en estudio, donde hay mayor prevalencia en la ciencia de materiales seguido por la química, ingenierías en general e ingeniería química.

En el Anexo 5. se muestra los tipos de documentos publicados en los últimos siete años sobre la materia de estudio, teniendo en cuenta que existen 25 artículos publicados, 8 artículos de revisión, 4 capítulos de libro y 3 artículos de conferencia, indicador que demuestra los avances en investigación de frontera sobre materiales nanocientíficos como la nanocelulosa.

Anexo 5. Tipo de publicaciones realizadas en los últimos siete años sobre nanocelulosa y nanotecnología.

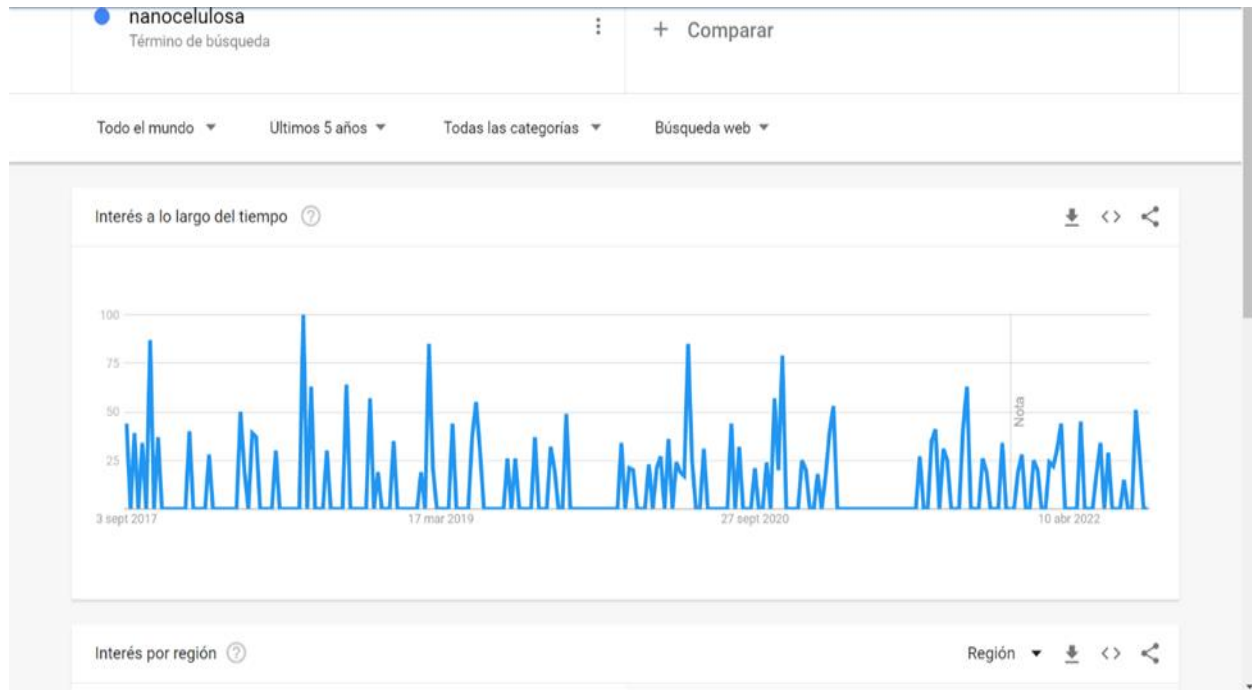


En la búsqueda por Google Trends del Anexo 6 sobre el tópico de nanocelulosa nos muestra la tendencia de interés a lo largo de los últimos cinco años como material promisorio en matriz

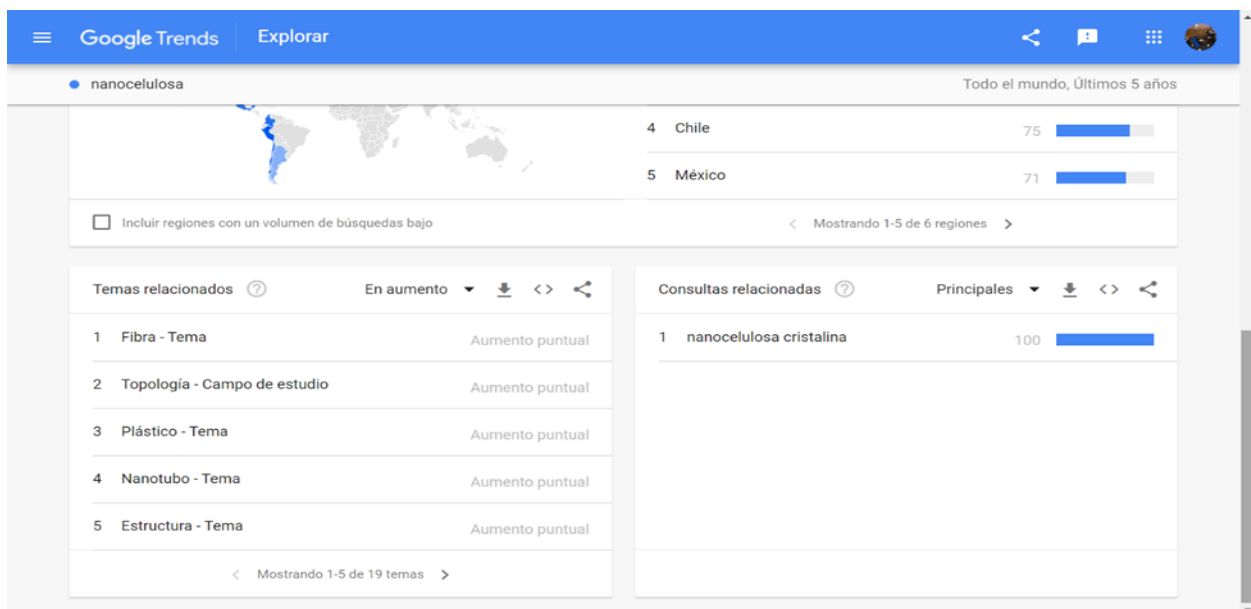


polimérica de compuestos de Carbono-Carbono (C-C), Dióxido de Silicio (SiO₂), silicio amorfo, aleaciones de Aluminio (Al), superaleaciones y vitrocerámica de expansión térmica Zerodur^{MR}.

Anexo 6. Tendencia en los últimos cinco años sobre el tópico de nanocelulosa.



Anexo 7. Interés a lo largo del tiempo por regiones sobre temas relacionados con la nanocelulosa.



Se realizará un estudio analítico del estado del arte en diferentes publicaciones indexadas en bases de datos como Scopus, Science Direct, Google Academic, AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) y Knovel, entre otras para el análisis físico-químico de la composición de la nanocelulosa como matriz polimérica, conforme a los resultados expuestos en la literatura en diferentes métodos de obtención o extracción, observando sus ventajas mecánicas, relación de coste, análisis funcional, métodos de revestimiento polimérico para resistencia en su composición.

Productos Esperados:

Colocar a consideración de un equipo editorial un artículo en revista indexada de educación sobre el estado del arte de la nanocelulosa como producto de revestimiento en el futuro para estructuras internas de equipos aeroespaciales o aeronáuticos.

Presentación como expositor oral o mural (póster) en congreso, coloquio o seminario dedicado a la educación, astronomía y/o nanociencia en MW-GAIA Bringing The Milky Way to Schools June 2-4 de 2021 con el trabajo Inclusive Astronomy: A Bridge Between Science and Society (<https://mao.tfai.vu.lt/mwschools/posters/poster-presentation-02.pdf>)

Participación en la construcción de un módulo educativo dedicado a enseñanza de la nanociencia, nanotecnología y sus aplicaciones.

Participación en eventos de carácter académico, científico y tecnológico sobre ciencia de materiales, nanotecnología, tecnologías cuánticas, biotecnología, redacción científica e investigación (soportes anexo complementario).

Estado del arte de las bondades ofrecidas por la nanocelulosa que permitan desarrollar materiales como alternativa de construcción o recubrimiento interno de módulos o equipos aeroespaciales, producción de algún artículo divulgativo o científico en revista indexada sobre los beneficios de la nanocelulosa como matriz polimérica en compuestos utilizados para recubrimiento de sistemas aeroespaciales.