Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/c4tm7403

# Nanomateriales de carbono para mejorar las propiedades mecánicas y eléctricas de materiales compuestos: una revisión sistemática sobre dispersión, interfaces, escalabilidad y riesgos ambientales

# Carbon Nanomaterials to Enhance Mechanical and Electrical Properties of Composite Materials: A Systematic Review on Dispersion, Interfaces, Scalability, and Environmental Risks

# Nanomateriali di carbonio per migliorare le proprietà meccaniche ed elettriche dei materiali compositi: una revisione sistematica su dispersione, interfacce, scalabilità e rischi ambientali

Johanna Michelle Salazar Chávez[I]
jsalazarc22@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6464-6158
Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Fausto Alejandro Pacurucu Ladines[I]
fpacurucul@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6635-0865
Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Luis Angel Loor Atauchi[I]
lloora7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5241-3491
Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Carlos Alejandro Veloz Almeida[I]
cveloza2@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3373-3875
Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguin Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

**Correspondencia:** jholguina7@unemi.edu.ec

**Aceptado:** 26/Noviembre/2026 **Publicado:**27/Noviembre/2026

1. Facultad de Ciencias e Ingenierías, Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

**Resumen**

El diseño de materiales compuestos de nueva generación exige combinar alta resistencia mecánica con conductividad eléctrica controlada sin comprometer la viabilidad económica ni la seguridad ambiental. En este contexto, el presente estudio desarrolla una revisión sistemática de la literatura orientada a responder cómo influye la incorporación de nanomateriales de carbono —grafeno, nanoplaquetas de grafeno, óxido de grafeno y nanotubos de carbono— en las propiedades y limitaciones de los materiales compuestos publicados entre 2020 y 2025. Mediante el protocolo PRISMA 2020 se consultaron OpenAlex y Europe PMC hasta el 22 de noviembre de 2026, depurando 435 registros iniciales hasta seleccionar 24 investigaciones empíricas primarias procedentes de 16 países. La síntesis cualitativa demuestra que fracciones reducidas de nanorelleno (0,1–2,0 % en peso) elevan notablemente la resistencia a tracción y flexión, la tenacidad interfacial, la conductividad anisotrópica y el blindaje electromagnético, siempre que se logre una dispersión homogénea y un acoplamiento interfacial eficaz. Sin embargo, exceder la carga óptima induce aglomeración, porosidad y pérdida mecánica, a lo que se suman limitaciones por costos energéticos de síntesis, pérdida parcial de tenacidad en fibras recicladas y riesgo de liberación de nanopartículas durante el mecanizado y el fin de vida útil.

**Palabras clave:** nanomateriales de carbono; grafeno; nanotubos de carbono; materiales compuestos; dispersión y nanoseguridad.

**Abstract**

Designing next-generation composite materials requires combining high mechanical strength with tailored electrical conductivity without compromising economic feasibility or environmental safety. Accordingly, this systematic literature review examines how the incorporation of carbon nanomaterials—graphene, graphene nanoplatelets, graphene oxide, and carbon nanotubes—influences both the functional properties and the technical, economic, and environmental limitations of composite materials reported between 2020 and 2025. Following the PRISMA 2020 protocol across OpenAlex and Europe PMC through November 22, 2026, 435 initial records were screened down to 24 primary empirical studies from 16 countries. Qualitative synthesis confirms that low nanofiller loadings (0.1–2.0 wt%) substantially increase tensile and flexural strength, interfacial toughness, anisotropic electrical conductivity, and electromagnetic shielding whenever uniform dispersion and robust interfacial bonding are achieved. Conversely, exceeding optimal thresholds triggers agglomeration, voids, and mechanical degradation, compounded by high synthesis energy footprints, toughness penalties in recycled fibers, and nanoparticle release hazards during machining and end-of-life stages.

**Keywords:** carbon nanomaterials; graphene; carbon nanotubes; composite materials; dispersion and nanosafety.

**Riassunto**

La progettazione di materiali compositi di nuova generazione richiede di combinare un'elevata resistenza meccanica con una conducibilità elettrica controllata, preservando la fattibilità economica e la sicurezza ambientale. Questa revisione sistematica della letteratura esamina come l'incorporazione di nanomateriali di carbonio (grafene, nanopiastrine di grafene, ossido di grafene e nanotubi di carbonio) influisca sulle proprietà e sui limiti dei materiali compositi descritti negli studi pubblicati tra il 2020 e il 2025. Seguendo il protocollo PRISMA 2020, sono state consultate le banche dati OpenAlex ed Europe PMC fino al 22 novembre 2026. Dei 435 record iniziali sono stati selezionati 24 studi empirici primari provenienti da 16 Paesi. La sintesi qualitativa mostra che basse frazioni di nanoriempitivo (0,1–2,0 % in peso) aumentano sensibilmente la resistenza a trazione e a flessione, la tenacità interfacciale, la conducibilità anisotropa e la schermatura elettromagnetica, a condizione che si ottengano una dispersione omogenea e un efficace accoppiamento interfacciale. Il superamento del contenuto ottimale di nanoriempitivo induce agglomerazione, porosità e una riduzione delle prestazioni meccaniche. A ciò si aggiungono i costi energetici della sintesi, la perdita parziale di tenacità nelle fibre riciclate e il rischio di rilascio di nanoparticelle durante la lavorazione meccanica e a fine vita.

**Parole chiave:** nanomateriali di carbonio; grafene; nanotubi di carbonio; materiali compositi; dispersione e nanosicurezza.

## 1. Introducción

En la ingeniería moderna de materiales, la sustitución progresiva de aleaciones metálicas pesadas por materiales compuestos ligeros responde a exigencias de eficiencia energética, durabilidad estructural y multifuncionalidad en sectores como la aeronáutica, el transporte eléctrico, la electrónica flexible y la infraestructura civil. Pese a sus ventajas en relación resistencia–peso, los compuestos poliméricos tradicionales exhiben baja conductividad eléctrica y vulnerabilidad a la delaminación interlaminar, mientras que las matrices metálicas ligeras enfrentan restricciones de resistencia mecánica y corrosión (Papageorgiou et al., 2020). Frente a estas limitaciones, la incorporación de nanomateriales de carbono principalmente grafeno, nanoplaquetas de grafeno (GNP), óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reducido (rGO) y nanotubos de carbono (CNT), tanto de pared simple (SWCNT) como de pared múltiple (MWCNT) ofrece una vía excepcional para reforzar matrices a escala nanométrica y habilitar conducción eléctrica con fracciones másicas mínimas (Ali et al., 2024).

Sin embargo, el desempeño real de un nanocompuesto rara vez iguala las predicciones teóricas ideales derivadas de las propiedades intrínsecas de una lámina aislada de grafeno o de un nanotubo individual. Su elevada energía superficial y las atracciones de van der Waals favorecen la formación de aglomerados que actúan como sitios de iniciación de grietas y dificultan la transferencia de esfuerzos en la interfase matriz–refuerzo. Al mismo tiempo, la conducción eléctrica depende de alcanzar el umbral de percolación y minimizar la resistencia de contacto por tunelamiento cuántico, variables extremadamente sensibles a la dispersión, la orientación y los tratamientos químicos de superficie (Lalire et al., 2024). Además, llevar estas formulaciones del laboratorio a la industria plantea retos críticos de escalabilidad, costos energéticos de producción y riesgos ambientales derivados del posible desprendimiento de nanomateriales durante el mecanizado, el desgaste o la disposición final (Munuera et al., 2021).

Aunque la literatura reciente ofrece revisiones valiosas sobre mecanismos de refuerzo mecánico, conducción en polímeros multifásicos o impactos ambientales y sanitarios de la familia del grafeno (Ding et al., 2022), estos enfoques suelen abordarse de manera fragmentada, sin analizar conjuntamente las ganancias mecánico-eléctricas y las barreras técnico-ambientales en un mismo corpus empírico. Por ello, esta revisión sistemática de la literatura (RSL) tiene como objetivo evaluar la evidencia científica reciente (2020–2025) para responder a la pregunta central: ¿cómo influye la incorporación de nanomateriales de carbono en las propiedades y limitaciones de los materiales compuestos? De manera complementaria, se examina el rol de la dispersión y la ingeniería interfacial sobre la resistencia y la conductividad, así como las restricciones de escalabilidad, costos, reciclabilidad y nanoseguridad.

Para presentar el análisis con claridad, el documento prosigue con la sección de Metodología, donde se describe el protocolo PRISMA 2020 y los criterios de selección documental; a continuación, la sección de Resultados integra el flujo de selección, el panorama bibliométrico y el análisis temático de propiedades mecánicas, eléctricas, dispersión y sostenibilidad apoyado en dos figuras analíticas y una tabla resumida de síntesis; seguidamente, la Discusión interpreta críticamente las compensaciones observadas frente a la literatura previa y delimita implicaciones y limitaciones; finalmente, las Conclusiones condensan los aportes esenciales y las líneas futuras prioritarias.

## 2. Metodología

Se ejecutó una revisión sistemática de la literatura (RSL) con síntesis cualitativa estructurada siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). La estrategia de búsqueda abarcó el periodo comprendido entre enero de 2020 y diciembre de 2025 (fecha de última actualización de búsqueda: 22 de noviembre de 2026) en dos plataformas científicas complementarias de acceso abierto y cobertura multidisciplinaria: OpenAlex: seleccionada por su

amplitud en ciencia de materiales, polímeros, ingeniería mecánica y evaluación de ciclo de vida y Europe PMC: empleada por su indexación estructurada de revistas arbitradas de nanotecnología, química de materiales y toxicología).

Para asegurar la reproducibilidad del protocolo se ejecutaron consultas estructuradas exactas en cada plataforma (última consulta: 22 de noviembre de 2026). En OpenAlex (n = 260 registros recuperados), aplicando los filtros comunes publication_year:2020-2025, type:article e is_retracted:false y ordenación descendente por citas (sort=cited_by_count:desc), se emplearon cuatro cadenas en el campo de título: (a) title.search:graphene|carbon nanotube|carbon nanomaterials combinada con title.search:composite|nanocomposite y title.search:mechanical|electrical|conductivity|dispersion|interfacial (100 registros en 2020–2025 y 60 registros específicos en 2024–2025); (b) title.search:graphene|carbon nanotube|carbon nanomaterials con title.search:composite|nanocomposite|polymer|cement y title.search:life cycle|environmental|toxicity|sustainability|scalability|cost|recycling (60 registros); y (c) title.search:graphene|carbon nanotube con title.search:life cycle|ecotoxicity|release|hazard|techno-economic|cost (40 registros). En Europe PMC (n = 175 registros), aplicando el filtro automático de acceso abierto con texto completo (OPEN_ACCESS:y AND HAS_FT:y) y el rango PUB_YEAR:[2020 TO 2025], se ejecutaron tres ecuaciones booleanas: (a) ((TITLE:graphene OR TITLE:MWCNT OR TITLE:SWCNT OR TITLE:nanotube*) AND (TITLE:composite* OR TITLE:nanocomposite*) AND (TITLE:mechanical OR TITLE:electrical OR TITLE:conductivity OR TITLE:dispersion OR TITLE:interfacial OR TITLE:environmental OR TITLE:toxicity)) (100 registros); (b) ((TITLE:graphene OR TITLE:nanotube* OR TITLE:MWCNT) AND (TITLE:composite* OR TITLE:nanocomposite* OR TITLE:polymer*) AND (TITLE:toxicity OR TITLE:environmental OR TITLE:sustainability OR TITLE:recycling OR TITLE:cost OR TITLE:scalable)) (35 registros); y (c) ((TITLE:graphene OR TITLE:nanotube* OR TITLE:MWCNT) AND (TITLE:release OR TITLE:toxicity OR TITLE:hazard OR TITLE:life OR TITLE:recycled OR TITLE:scalable) AND (ABSTRACT:composite* OR ABSTRACT:nanocomposite*)) (40 registros).

Los criterios formales de elegibilidad incluyeron: (a) artículos empíricos primarios revisados por pares publicados entre enero de 2020 y diciembre de 2025 con identificador DOI y metadatos completos; (b) publicación en idioma inglés, restricción aplicada formalmente durante las fases de cribado y evaluación de elegibilidad en coherencia con los descriptores en inglés y la indexación internacional de las plataformas consultadas; y (c) reporte de métricas cuantitativas sobre materiales compuestos reforzados con nanomateriales de carbono en al menos uno de dos niveles complementarios: métricas mecánicas, eléctricas, de dispersión o de liberación medidas directamente sobre el compuesto (n = 23), o evaluaciones de análisis de ciclo de vida (LCA) de la síntesis aguas arriba del nanorelleno cuando cuantifican las emisiones y la escalabilidad que

condicionan su uso en compuestos —criterio bajo el cual se incluyó el estudio de Teah et al. (2020), centrado en la síntesis de CNT mediante deposición química en fase vapor (CVD), dado que dicha etapa concentra la mayor carga ambiental de la cadena de fabricación de compuestos de CNT y el propio estudio analiza sus implicaciones para aplicaciones en compuestos y materiales en bloque—. Se excluyeron revisiones secundarias, editoriales (reservando siete revisiones especializadas y la guía PRISMA 2020 únicamente para contextualizar la introducción, la metodología y la discusión) y trabajos limitados a catálisis, adsorción acuosa o biosensores sin evaluación estructural, eléctrica o ambiental de compuestos.

Tras la eliminación automatizada de duplicados por DOI y título, el cribado de títulos y resúmenes, la valoración en texto completo y la extracción de datos en una matriz estandarizada (autor, año, país, matriz, nanorelleno, fracción másica, método de dispersión, propiedades mecánicas y eléctricas, indicadores de LCA y liberación de partículas) fueron realizados de manera independiente por dos revisores. Las discrepancias en la elegibilidad o en la categorización temática se resolvieron mediante discusión y consenso entre ambos revisores y, en caso de desacuerdo persistente, con la intervención de un tercer coautor tras revisar conjuntamente el texto completo. No se aplicó una herramienta formal estandarizada de evaluación de calidad o riesgo de sesgo debido a la marcada heterogeneidad metodológica entre ensayos experimentales de materiales, modelado numérico, análisis de ciclo de vida y ensayos de ecotoxicidad; en su lugar, se verificó la revisión por pares, la trazabilidad de controles experimentales y la consistencia de las métricas reportadas, asumiéndose la ausencia de evaluación formal del riesgo de sesgo como una limitación explícita del estudio.

## 3. Resultados

### *Selección documental y panorama general de la evidencia*

Las búsquedas sistemáticas arrojaron 435 registros iniciales (260 en OpenAlex y 175 en Europe PMC). Al cruzar identificadores DOI y títulos se suprimieron 44 duplicados, quedando 391 registros únicos para el cribado inicial por título y resumen. En esta etapa se descartaron 323 publicaciones que correspondían a revisiones no empíricas o a aplicaciones ajenas a compuestos estructurales y conductores. De los 68 artículos evaluados en texto completo, 44 fueron excluidos por tratarse de revisiones secundarias sin datos primarios (n = 19), investigaciones restringidas a catálisis o sensado químico sin evaluación mecánica o de ciclo de vida del compuesto (n = 16) o reportes con métricas incompletas o redundantes (n = 9). El corpus definitivo quedó integrado por 24 estudios empíricos primarios, cuyo recorrido de depuración se sintetiza en la Figura 1 y cuya identificación completa se detalla en el Anexo 1.



Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1609-1626 , ISSN: 3103 – 1315

**Figura 1**

*Diagrama horizontal PRISMA 2020 del proceso de selección de estudios sobre nanomateriales de carbono en materiales compuestos (2020–2025).*




*Nota.* Elaboración propia adaptada de PRISMA 2020 (Page et al., 2021) a partir de los registros consultados en OpenAlex y Europe PMC (última búsqueda: 22 de noviembre de 2026).

El conjunto seleccionado abarca el sexenio 2020–2025 con continuidad anual (cinco estudios en 2020, seis en 2021, tres en 2022, dos en 2023, cuatro en 2024 y cuatro en 2025) y exhibe una notable diversidad geográfica con primeros autores afiliados a instituciones de 16 países: China (n = 7; 29,2 %), España y Malasia (n = 2 cada uno; 16,7 % conjunto), y un estudio por país (4,2 % cada uno) proveniente de Alemania, Australia, Azerbaiyán, Canadá, Chile, Corea del Sur, Estados Unidos, Francia, India, Irán, Japón, Reino Unido y Turquía. Metodológicamente, el 75,0 % (n = 18) corresponde a investigaciones experimentales cuantitativas de laboratorio, el 12,5 % (n = 3) articula experimentación con modelado analítico o de elementos finitos y el 12,5 % restante (n = 3) aborda análisis de ciclo de vida o nanoseguridad y liberación de aerosoles. En cuanto al tipo de matriz, 23 trabajos (95,8 %) emplearon matrices poliméricas (termoestables como epoxi y poliéster, termoplásticos como poliamida 6 (PA6), ácido poliláctico (PLA), polimetilmetacrilato (PMMA), poliuretano termoplástico (TPU) y tereftalato de polietileno reciclado (RPET), y elastómeros como polidimetilsiloxano (PDMS), poli(estireno-b-isopreno-b-estireno) (SIS) y polisiloxano) y uno (4,2 %) evaluó una matriz metálica biodegradable de magnesio (Munir et al., 2020). Atendiendo al nanorelleno utilizado (Figura 2B), el 45,8 % (n = 11) empleó exclusivamente nanotubos de carbono, el 41,7 % (n = 10) utilizó derivados del grafeno (grafeno plano, GNP, GO o rGO) y el 12,5 % (n = 3) evaluó sistemas híbridos o comparativos entre ambos.

***Desempeño mecánico e ingeniería de interfaces matriz–nanorelleno***

La evidencia reunida confirma que la incorporación de nanomateriales de carbono incrementa sustancialmente la resistencia mecánica y la tenacidad cuando se consolida una interfase matriz–refuerzo capaz de transferir esfuerzos sin despegamiento prematuro. Como ilustra la Figura 2A, las ganancias experimentales abarcan desde aumentos del 24,0 % al 41,3 % en resistencia a flexión hasta incrementos del 49,0 % al 161,9 % en resistencia a tracción y del 160,0 % en tenacidad a la fractura. En compuestos laminados reforzados con fibras continuas, el tratamiento superficial de fibras de carbono con CNT silanizados en matriz de PA6 elevó en 20,0 % la resistencia a tracción, 25,11 % la flexión y 24,88 % la resistencia al cortante interlaminar, restringiendo la movilidad de las cadenas poliméricas en la interfase (Du et al., 2024).

Resultados aún más pronunciados se obtuvieron al injertar epoxi hiperramificado sobre MWCNT (2 % en peso) en compuestos de fibra de aramida/epoxi, logrando aumentos del 41,3 % en resistencia a flexión y del 30,9 % en cortante interlaminar con elevada retención mecánica tras envejecimiento termo-oxidativo (Peng et al., 2025). En sistemas sin fibra continua, el tipo de acoplamiento químico o físico resulta igualmente determinante: en elastómeros grafeno/SIS, las interacciones no covalentes de apilamiento π–π con los anillos fenilo fortalecieron simultáneamente la respuesta tensil, la dureza y la conductividad térmica (Han et al., 2021). Por su parte, en matrices metálicas de magnesio la adición de menos de 0,3 % en peso de GNP por pulvimetalurgia mejoró la resistencia a compresión, la ductilidad y la resistencia a la corrosión sin manifestar citotoxicidad en células SaOS2.

En la frontera estructural aeroespacial, Evers et al.,(2023) fabricaron laminados unidireccionales con más de 80 % en peso de hilos continuos de CNT altamente alineados, alcanzando una resistencia específica de 1,71 GPa/(g cm$^{-3}$) y un módulo específico de 256 GPa/(g cm$^{-3}$), cifra 2,76 veces mayor que la del hilo constituyente y superior a los laminados convencionales de fibra de carbono. En contraste con estas ganancias, Salas et al.,(2021) documentaron una limitación relevante al crecer CNT ultrarrápidamente sobre fibras de carbono recuperadas por termólisis a 500 °C: aunque la fibra se recuperó sin daño aparente, la tenacidad interlaminar en modo I disminuyó entre 29,3 % y 34,9 % frente a la fibra virgen de 1052,5 J m$^{-2}$, evidenciando que el reciclaje térmico debilita el anclaje interfacial original (Figura 2A).

***Conductividad eléctrica, umbral de percolación y respuesta multifuncional***

En el plano eléctrico y multifuncional, los resultados indican que la arquitectura de la red conductora y la relación de aspecto del relleno pesan más que su porcentaje total. Al orientar grafeno plano capa por capa en poli(alcohol vinílico) (PVA) mediante puentes moleculares de naftalenosulfonato, (Zhuang et al., 2020) lograron una marcada anisotropía de nueve órdenes de magnitud ($10^{-1}$ S cm$^{-1}$ en el plano frente a $10^{-10}$ S cm$^{-1}$ fuera del plano), acompañada de un salto

en resistencia a tracción de 42,0 a 110,0 MPa al 5 % en peso. Con una lógica arquitectónica similar, Song et al. (2021) infiltraron PDMS en aerogeles tridimensionales de carbono celulósico@rGO (3,05 % en peso), alcanzando una eficacia de blindaje electromagnético (EMI) de 51 dB lo que sería 3,9 veces superior a los 13 dB de una mezcla convencional con idéntica carga junto con buena estabilidad térmica.

La combinación híbrida de nanoestructuras bidimensionales y unidimensionales potencia adicionalmente la percolación: (Luo et al., 2021) demostraron en PMMA que acoplar GNP con CNT funcionalizados reduce el umbral de percolación y permite ajustar la anisotropía eléctrica entre 0,01 y 1000 según la proporción de rellenos. En concordancia con este comportamiento (Lee et al., 2022) confirmaron mediante calandrado de tres rodillos que los MWCNT de mayor relación de aspecto generan redes eléctricas y térmicas más eficientes en toda la matriz.

Por otro lado, la calidad de la zona interfacial ejerce un control determinante sobre el transporte electrónico: el modelado analítico validado de (Zare et al., 2024) demostró que una interfase deficiente alrededor de las láminas de grafeno y el incremento en la distancia de tunelamiento abaten abruptamente la conductividad efectiva del compuesto. Complementariamente, la ingeniería de porosidad en películas de polisiloxano/MWCNT fabricadas por lixiviación salina permitió obtener nanogeneradores triboeléctricos flexibles escalables con salidas de 65 V, 6,9 µA y una densidad de potencia de 280,6 mW $m^{-2}$ (Gulahmadov et al., 2025).

***Dispersión, paradoja de la aglomeración y manufactura avanzada***

Un hallazgo transversal en el corpus es que la dispersión de nanopartículas define una ventana estrecha de operación cuya superación revierte las mejoras estructurales. En matrices epoxi, la combinación de agitación mecánica y ultrasonicación en un paso situó el óptimo de tracción en 0,1 % en peso de GNP (57,31 MPa; módulo de 1,86 GPa) y el de flexión en 0,25 % en peso (113,18 MPa) (Siddiqui et al., 2024). Al comparar directamente MWCNT, GNP y GO a 0,4 % en peso mediante una ruta ecológica libre de solventes orgánicos tóxicos, Mirzapour et al. (2024) observaron que el GO ofrece la mejor dispersión e interacción interfacial, elevando la tracción en 49 %, la tenacidad en 160 % y el módulo de almacenamiento en 31 %, además de reducir la absorción de agua entre 16 % y 26 %.

Sin embargo, cuando se supera la fracción crítica de refuerzo, los efectos adversos aparecen con rapidez: (Uthaman et al., 2021) comprobaron que incluso empleando surfactantes en matrices epoxi, rebasar el 1,5 % en peso de MWCNT al alcanzar el 2 % en peso induce aglomeración, microgrietas y mayor captación de humedad. De manera particularmente reveladora, (Tamayo-Vegas et al., 2022) cuantificaron mediante ensayos dinámicos y modelado de elementos finitos un comportamiento divergente frente a la aglomeración: entre 0 y 5 % en peso de CNT, el módulo elástico alcanzó su máximo en 2 % en peso y decayó a 4–5 % en peso debido a porosidad y cúmulos

locales, mientras que la conductividad eléctrica creció exponencialmente a partir del 2 % en peso porque los propios aglomerados facilitaron rutas de tunelamiento electrónico.

En manufactura aditiva, el control de la dispersión y del contenido de nanorelleno también modula las capacidades funcionales del producto impreso. La impresión 3D mediante procesamiento digital de luz (DLP) de resinas con CNT exhibió una respuesta piezorresistiva lineal con factores de galga entre 2 y 3, alcanzando mayor sensibilidad a menores concentraciones debido a la mayor distancia interpartícula (Cortés et al., 2020). Asimismo, la impresión por modelado por deposición fundida (FDM) de compuestos híbridos de PLA con 1,5 % en peso de CNT y 0,5 % en peso de grafeno incrementó la resistencia última a tracción de 28 a 48 MPa, el módulo elástico de 2,6 a 4,0 GPa y la energía de impacto de 1,2 a 4,0 J frente al polímero sin reforzar (Pradeep Kumar et al., 2025).

***Escalabilidad industrial, costos energéticos, reciclabilidad y nanoseguridad***

Más allá del laboratorio, los estudios centrados en sostenibilidad y manufactura revelan que los costos energéticos y los riesgos ambientales condicionan críticamente la adopción industrial. En la etapa de síntesis, (Teah et al., 2020) cuantificaron emisiones de gases de efecto invernadero que varían desde 28,55 kg $CO_2e$/g de CNT mediante deposición química en fase vapor (CVD) sobre sustrato hasta 0,48 kg $CO_2e$/g en reactores de lecho fluidizado, proyectando hasta 0,02 kg $CO_2e$/g únicamente bajo escalamiento industrial continuo. En términos de nanoseguridad, (Pras et al., 2020) demostraron mediante espectroscopía Raman y ensayos tribológicos que el estado de dispersión controla directamente el riesgo de emisión: los CNT aglomerados se desprenden fácilmente como fibras libres, mientras que una dispersión homogénea con interfases fuertes inhibe la liberación individual.

En la fase de mecanizado y envejecimiento, (Aznar Mollá et al., 2022) midieron emisiones significativas de partículas nanométricas al lijar compuestos poliéster/grafeno sometidos a intemperismo, identificando efectos tóxicos en Daphnia magna y mayor vulnerabilidad en células humanas Caco2 que en fibroblastos A549. Como contrapartida frente a las barreras de costo y escalabilidad, la impresión 3D con alineación vertical programada de TPU/grafeno alcanzó una conductividad térmica de 12 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ocho veces superior a la impresión horizontal demostrando su viabilidad para gestión térmica escalable en electrónica y baterías (Guo et al., 2021).

De forma complementaria, la valorización de residuos poliméricos y carbonosos abre rutas prometedoras de economía circular. El mezclado en fundido de alto cizallamiento integrando 0,5 % en peso de GNP reciclado de neumáticos fuera de uso en mezclas biobasadas PLA/TPU incrementó en 24 % la resistencia a flexión y en 15 % la conductividad térmica con 99,58 % de recuperación de forma (Cetiner et al., 2023). Igualmente, el moldeo por inyección de mezclas de PET reciclado y poliamida 11 con 1 parte por cien de resina (phr) de GNP mejoró la estabilidad

térmica (temperatura máxima de degradación, Tmax, de 410,38 a 430,06 °C) y el retardo a la llama (LOI de 19 a 24), aunque cargas de 2 a 4 phr reprodujeron problemas de aglomeración (Habib et al., 2025). La Tabla 1 presenta una síntesis resumida de las ganancias y limitaciones por eje analítico.

**Tabla 1**

*Resumen comparativo de ganancias y limitaciones por eje temático (n = 24)*

| Eje temático | Carga / enfoque | Mejora clave (frente a control) | Limitación crítica |
|---|---|---|---|
| **Mecánica e interfaces** | 0,3–2 % en peso (o >80 % en peso en hilos continuos de CNT); silanos, epoxi hiperramificado y apilamiento π–π | +20,0 % tracción y +25,1 % flexión vs. CF/PA6 sin tratar (Du et al., 2024); +41,3 % flexión vs. AFRP sin modificar (Peng et al., 2025); módulo específico de 256 GPa/(g $cm^{-3}$) superior a fibra de carbono (Evers et al., 2023) | Caída de 29,3–34,9 % en tenacidad modo I frente a fibra de carbono virgen tras reciclaje térmico (Salas et al., 2021) |
| **Conductividad eléctrica** | Redes 3D preformadas (3,05 % en peso), orientación plana (5–10 % en peso) e híbridos GNP/f-CNT | Blindaje EMI de 51 dB vs. 13 dB en mezcla convencional PDMS/CCA/rGO (Song et al., 2021); anisotropía eléctrica 0,01–1000 en PMMA (Luo et al., 2021); 280,6 mW $m^{-2}$ en TENG poroso (Gulahmadov et al., 2025) | Interfases deficientes y mayor distancia de tunelamiento reducen abruptamente la conductividad efectiva (Zare et al., 2024) |
| **Dispersión y manufactura 3D** | 0,1–1,5 % en peso sin solventes, ultrasonicación, surfactantes e impresión 3D (DLP/FDM) | +160 % tenacidad y +49 % tracción en 0,4 % en peso GO/epoxi vs. epoxi puro (Mirzapour et al., 2024); +71,4 % tracción en PLA híbrido 3D vs. PLA puro (Pradeep Kumar et al., 2025); factor de galga 2–3 en DLP (Cortés et al., 2020) | Sobre 1,5–2 % en peso la aglomeración genera microvacíos y pérdida mecánica pese al alza eléctrica (Uthaman et al., 2021; Tamayo-Vegas et al., 2022) |
| **Escalabilidad, costos y LCA** | Síntesis CVD en lecho fluidizado, mezclado en fundido e inyección con GNP y polímeros reciclados | Estimación LCA de 0,48 vs. 28,55 kg $CO_2$e/g en CVD sustrato, con proyección de 0,02 kg $CO_2$e/g bajo escalamiento industrial (Teah et al., 2020); +24 % flexión vs. PLA/TPU sin GNP (Cetiner et al., 2023); LOI 19→24 en RPET/PA-11 (Habib et al., 2025) | Liberación de partículas al lijar y toxicidad en Daphnia magna y células Caco2 (Aznar Mollá et al., 2022); desprendimiento de CNT mal dispersos por abrasión (Pras et al., 2020) |

*Nota.* Elaboración propia con base en los 24 estudios empíricos incluidos (2020–2025; véase Anexo 1). CNT = nanotubos de carbono; f-CNT = CNT funcionalizados; GNP = nanoplaquetas de grafeno; GO = óxido de grafeno; rGO = óxido de grafeno reducido; CF = fibra de carbono; AFRP = polímero reforzado con fibra de aramida; CCA = aerogel de carbono celulósico; EMI = blindaje electromagnético; TENG = nanogenerador triboeléctrico; DLP = procesamiento digital

de luz; FDM = modelado por deposición fundida; LCA = análisis de ciclo de vida; CVD = deposición química en fase vapor; RPET = PET reciclado; LOI = índice límite de oxígeno.

En síntesis, la literatura analizada deja al descubierto cuatro vacíos prioritarios: la escasez de análisis técnico-económicos (TEA) acoplados a evaluaciones de ciclo de vida completas que cuantifiquen el costo real por kilogramo procesado; la falta de estandarización internacional para medir cuantitativamente el grado de dispersión y aglomeración entre laboratorios; la baja proporción de ensayos de nanoseguridad y envejecimiento bajo condiciones industriales reales de corte, desgaste e incineración; y una representatividad todavía marginal de investigaciones en matrices no poliméricas y en contextos productivos latinoamericanos (4,2 % del corpus).

## 4. Discusión

Al examinar de forma integrada la evidencia empírica de los últimos seis años (2020–2025), se comprueba que la incorporación de nanomateriales de carbono no actúa como un aditivo lineal de tipo "a mayor carga, mejor desempeño", sino como un modulador microestructural gobernado por umbrales críticos y compensaciones. Responder a cómo influyen estos nanomateriales en las propiedades y limitaciones de los compuestos exige reconocer una dualidad esencial: fracciones reducidas (0,1–2,0 % en peso) reconfiguran profundamente la rigidez, la tenacidad interlaminar, la conductividad eléctrica y la atenuación electromagnética, pero el aprovechamiento efectivo de dicho potencial queda supeditado a controlar simultáneamente la dispersión, la química interfacial, el costo energético de síntesis y la contención ambiental durante todo el ciclo de vida.

Una lectura analítica de las mejoras mecánicas y eléctricas revela que la arquitectura espacial y la transferencia interfacial explican gran parte de la variabilidad entre estudios. Cuando las láminas de grafeno o los nanotubos se acoplan químicamente mediante silanos, polímeros hiperramificados o grupos oxigenados bien exfoliados, la matriz absorbe energía mediante desviación y puenteo de grietas, explicando incrementos de hasta el 160 % en tenacidad con apenas 0,4 % en peso de óxido de grafeno (Mirzapour et al., 2024). De modo paralelo, el salto de 13 a 51 dB en blindaje EMI obtenido al reemplazar mezclas aleatorias por aerogeles 3D preformados confirma que diseñar redes continuas resulta mucho más eficaz que incrementar el porcentaje másico de relleno (Song et al., 2021). Esto sugiere que la ingeniería de interfases constituye el punto de equilibrio más delicado: una funcionalización insuficiente debilita la transferencia de carga, pero una oxidación excesiva fractura la red $sp^2$ y merma la conductividad eléctrica (Tarhini & Tehrani-Bagha, 2023).

Particular atención merece la convergencia entre la dispersión de nanopartículas y la seguridad ambiental. Aunque la aglomeración suele analizarse únicamente como un defecto mecánico que genera microvacíos y absorción de agua por encima del 1,5 % en peso (Uthaman et al., 2021), el contraste con (Tamayo-Vegas et al., 2022) expone una tensión técnica significativa: los mismos conglomerados de CNT que abaten el módulo elástico pueden acelerar la conducción eléctrica al

reducir distancias de tunelamiento. Sin embargo, incorporar la perspectiva de ciclo de vida resuelve esa ambigüedad a favor de la dispersión homogénea, dado que los aglomerados poseen baja cohesión interna y facilitan el desprendimiento de fibras libres bajo fricción (Pras et al., 2020). Este riesgo adquiere especial relevancia sanitaria y ecológica frente a la toxicidad en Daphnia magna y células humanas Caco2 observada tras el lijado de compuestos de grafeno envejecidos (Aznar Mollá et al., 2022), lo que convierte a la buena dispersión en un criterio central de diseño seguro desde el origen.

Al contrastar estos hallazgos con revisiones de referencia del área, emergen coincidencias sólidas y matices necesarios. De manera similar a lo reportado por (Osman et al., 2022), nuestra síntesis corrobora que los sistemas híbridos y el control de orientación en manufactura aditiva lideran la frontera multifuncional a bajas cargas. No obstante, a diferencia de trabajos centrados exclusivamente en maximizar propiedades en laboratorio, la integración de evidencia de ciclo de vida respalda las advertencias previas sobre el alto costo energético de producción (Munuera et al., 2021). Como ilustra la brecha cercana a dos órdenes de magnitud entre la síntesis CVD en sustrato y el lecho fluidizado (Teah et al., 2020), así como la pérdida interlaminar del 29 al 35 % al reutilizar fibras recicladas térmicamente (Salas et al., 2021), la sostenibilidad no está garantizada automáticamente. Frente a esta tensión, la valorización de grafeno recuperado de neumáticos mediante mezclado en fundido demuestra que la circularidad industrial es técnicamente viable cuando se emplean compatibilizantes adecuados y cargas reducidas (Cetiner et al., 2023).

Estos hallazgos conllevan implicaciones directas para la industria y la investigación aplicada. Desde el punto de vista práctico, conviene priorizar procesos escalables libres de solventes orgánicos como el mezclado en fundido de alto cizallamiento, el calandrado de tres rodillos o la ultrasonicación optimizada a bajas cargas y preferir nanorellenos sintetizados en lecho fluidizado o recuperados de corrientes secundarias, incorporando extracción de aerosoles durante el mecanizado de piezas compuestas. En el plano teórico, el estudio articula en un mismo marco explicativo la mecánica interfacial, la percolación eléctrica y la liberación de nanopartículas. Metodológicamente, se requiere que futuros trabajos estandaricen indicadores cuantitativos de dispersión, amplíen la investigación en matrices metálicas y cementicias y acoplen ensayos mecánico-eléctricos con análisis técnico-económicos y evaluaciones de ciclo de vida integrales.

Finalmente, una lectura prudente de esta revisión exige reconocer sus limitaciones metodológicas: la búsqueda se acotó a dos bases de datos (OpenAlex y Europe PMC), al periodo 2020–2025 (con última actualización el 22 de noviembre de 2026) y a artículos arbitrados en idioma inglés como criterio formal de elegibilidad, excluyendo literatura técnica patentada o reportes industriales no públicos; asimismo, la alta heterogeneidad entre ensayos mecánico-eléctricos, modelado numérico, análisis de ciclo de vida y ensayos de ecotoxicidad impidió calcular estimadores meta-analíticos agregados y condujo a prescindir de una herramienta formal estandarizada de evaluación

de calidad o riesgo de sesgo, lo cual constituye una limitación explícita que aconseja cautela al comparar magnitudes entre estudios. Pese a ello, la convergencia observada entre estudios de 16 países permite sostener que los nanomateriales de carbono ofrecen una vía prometedora para mejorar los materiales compuestos, siempre que la innovación en laboratorio avance en equilibrio con la dispersión controlada, la viabilidad económica a escala industrial y la gestión rigurosa de la nanoseguridad.

## 5. Conclusiones

La evidencia empírica revisada (2020–2025) demuestra que las mejoras mecánicas y eléctricas inducidas por grafeno, CNT y sistemas híbridos dependen estrechamente de la matriz, la carga y la estrategia de dispersión empleadas. En matrices poliméricas termoestables y termoplásticas (epoxi, PA6, fibra de aramida/epoxi, PVA, PMMA y PLA) y en matriz metálica de magnesio, las mayores ganancias estructurales se alcanzaron en ventanas bajas de carga (0,1–2,0 % en peso mediante ultrasonicación, calandrado de tres rodillos, rutas sin solventes o funcionalización con silanos, epoxi hiperramificado y apilamiento π–π), así como en laminados unidireccionales con más de 80 % en peso de hilos continuos de CNT; en paralelo, las mayores prestaciones eléctricas y de blindaje electromagnético se obtuvieron en elastómeros y polímeros (PDMS, PVA, PMMA y polisiloxano) mediante redes 3D preformadas (3,05 % en peso), orientación plana o híbridos GNP/CNT. Superar los umbrales óptimos de 1,5–2,0 % en peso en sistemas dispersos promueve aglomeración y microvacíos que degradan la resistencia mecánica y elevan la absorción de humedad.

Las barreras para la escalabilidad industrial trascienden el comportamiento mecánico-eléctrico e involucran la brecha de emisiones energéticas entre la síntesis CVD a pequeña escala y el lecho fluidizado (cuyas proyecciones de 0,02 kg $CO_2$e/g requieren validación industrial plena), los costos de procesamiento y la pérdida parcial de tenacidad interlaminar al reciclar térmicamente fibras de carbono. En materia de nanoseguridad, resulta imprescindible distinguir entre la liberación física de partículas nanométricas o CNT individuales observada durante el mecanizado (lijado), la abrasión tribológica y el intemperismo —fenómeno fuertemente atenuado cuando existe buena dispersión e interfase robusta— y los efectos biológicos medidos específicamente en ensayos de ecotoxicidad acuática (Daphnia magna) y citotoxicidad in vitro (líneas celulares humanas Caco2 y A549), sin extrapolar automáticamente ambos planos a escenarios clínicos poblacionales.

Proyectar estos nanocompuestos de carbono hacia aplicaciones industriales competitivas y responsables demandará consolidar procesos continuos libres de solventes orgánicos, aprovechar rutas circulares con polímeros reciclados (como RPET/PA-11) y GNP recuperados de residuos compatibles con bajas cargas, e integrar desde las etapas tempranas de diseño evaluaciones



Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1609-1626 , ISSN: 3103 – 1315

formales de riesgo de sesgo, análisis técnico-económicos, estudios de ciclo de vida completos y controles de higiene industrial frente a la emisión de aerosoles durante el mecanizado.

**Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Guayas, Ecuador, por el acompañamiento académico e institucional otorgado durante la elaboración de esta revisión sistemática de la literatura.

**Referencias**

Ali, Z., Yaqoob, S., Yu, J., & D'Amore, A. (2024). Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications. *Composites Part C: Open Access*, *13*, 100434. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434

Aznar Mollá, F., Heredia, J. A., Andreu-Sánchez, Ó., Fito, C., & Colmenar, I. (2022). Nanosafety analysis of graphene-based polyester resin composites on a life cycle perspective. *Nanomaterials*, *12*(12), 2036. https://doi.org/10.3390/nano12122036

Cetiner, B., Şahin Dündar, G., Yusufoğlu, Y., & Saner Okan, B. (2023). Sustainable engineered design and scalable manufacturing of upcycled graphene reinforced polylactic acid/polyurethane blend composites having shape memory behavior. *Polymers*, *15*(5), 1085. https://doi.org/10.3390/polym15051085

Cortés, A., Sánchez-Romate, X. F., Jiménez-Suárez, A., Campo, M., Ureña, A., & Prolongo, S. G. (2020). Mechanical and strain-sensing capabilities of carbon nanotube reinforced composites by digital light processing 3D printing technology. *Polymers*, *12*(4), 975. https://doi.org/10.3390/polym12040975

Ding, X., Pu, Y., Tang, M., & Zhang, T. (2022). Environmental and health effects of graphene-family nanomaterials: Potential release pathways, transformation, environmental fate and health risks. *Nano Today*, *42*, 101379. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101379

Du, H., Xian, G., Tian, J., Ma, Z., Li, C., Xin, M., & Zhang, Y. (2024). Effect of fiber surface treatment with silane coupling agents and carbon nanotubes on mechanical properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Polymer Composites*, *46*(2), 1267-1283. https://doi.org/10.1002/pc.29035

Evers, C., Vondrasek, B., Jolowsky, C. N., Park, J. G., Czabaj, M. W., Ku, B., Thagard, K., Odegard, G. M., & Liang, Z. (2023). Scalable high tensile modulus composite laminates

using continuous carbon nanotube yarns for aerospace applications. *ACS Applied Nano Materials*, *6*(13), 11260-11268. https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01266

Gulahmadov, O., Gahramanli, L. R., Muradov, M., Musayeva, N. N., Bellucci, S., Todorova, N., & Trapalis, C. (2025). Porous polysiloxane MWCNT nanocomposites for high-performance and scalable triboelectric nanogenerators. *RSC Advances*, *15*(38), 31917-31930. https://doi.org/10.1039/d5ra05894e

Guo, H., Zhao, H., Niu, H., Ren, Y., Fang, H., Fang, X., Lv, R., Maqbool, M., & Bai, S.-L. (2021). Highly thermally conductive 3D printed graphene filled polymer composites for scalable thermal management applications. *ACS Nano*, *15*(4), 6917-6928. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10768

Habib, U., Ali Mohsin, M. E., Khan, Z. I., Mohamad, Z., Othman, N., Mousa, S., Hossain, S. S., & Ali, S. S. (2025). Mechanical, thermal, and flammability properties of eco-friendly nanocomposites from recycled PET/PA-11 blends reinforced with graphene nanoplatelets. *Polymers*, *17*(8), 1038. https://doi.org/10.3390/polym17081038

Han, X., Kong, H., Chen, T., Gao, J., Zhao, Y. Z., Sang, Y., & Hu, G. (2021). Effect of π–π stacking interfacial interaction on the properties of graphene/poly(styrene-b-isoprene-b-styrene) composites. *Nanomaterials*, *11*(9), 2158. https://doi.org/10.3390/nano11092158

Lalire, T., Longuet, C., & Taguet, A. (2024). Electrical properties of graphene/multiphase polymer nanocomposites: A review. *Carbon*, *225*, 119055. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119055

Lee, D.-K., Yoo, J., Kim, H., Kang, B.-H., & Park, S. H. (2022). Electrical and thermal properties of carbon nanotube polymer composites with various aspect ratios. *Materials*, *15*(4), 1356. https://doi.org/10.3390/ma15041356

Luo, X., Yang, G., & Schubert, D. W. (2021). Electrically conductive polymer composite containing hybrid graphene nanoplatelets and carbon nanotubes: Synergistic effect and tunable conductivity anisotropy. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *5*(1), 250-262. https://doi.org/10.1007/s42114-021-00332-y

Mirzapour, M., Cousin, P., Robert, M., & Benmokrane, B. (2024). Dispersion characteristics, the mechanical, thermal stability, and durability properties of epoxy nanocomposites reinforced with carbon nanotubes, graphene, or graphene oxide. *Polymers*, *16*(13), 1836. https://doi.org/10.3390/polym16131836

Munuera, J., Britnell, L., Santoro, C., Cuéllar-Franca, R. M., & Casiraghi, C. (2021). A review on sustainable production of graphene and related life cycle assessment. *2D Materials*, *9*(1), 012002. https://doi.org/10.1088/2053-1583/ac3f23

Osman, A., Elhakeem, A., Kaytbay, S., & Ahmed, A. (2022). A comprehensive review on the thermal, electrical, and mechanical properties of graphene-based multi-functional epoxy composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *5*(2), 547-605. https://doi.org/10.1007/s42114-022-00423-4

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E. A., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S. J., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Papageorgiou, D. G., Li, Z., Liu, M., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2020). Mechanisms of mechanical reinforcement by graphene and carbon nanotubes in polymer nanocomposites. *Nanoscale*, *12*(4), 2228-2267. https://doi.org/10.1039/c9nr06952f

Peng, H., Zhan, Y., He, Z., Lei, F., Bai, Z., Wang, P., Li, K., Li, Y., Zhong, F., Feng, W., & Yang, X. (2025). Enhancing the interfacial interactions and thermal oxidative mechanical properties of aramid fiber-reinforced epoxy composites through hyperbranched epoxy-grafted multi-walled carbon nanotubes. *Polymer Composites*, *47*(2), 1676-1692. https://doi.org/10.1002/pc.70244

Pradeep Kumar, G. S., Keshavamurthy, R., Panigrahi, S. P., Thomas, S., Thejaraju, R., Hebbar, G. S., Prasad, C. D., & Aden, A. A. (2025). Enhanced mechanical properties of CNT/graphene reinforced PLA-based composites fabricated via fused deposition modelling. *Results in Engineering*, *25*, 104472. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104472

Pras, M., Gérard, J.-F., Golanski, L., Quintard, G., & Duchet-Rumeau, J. (2020). Key role of the dispersion of carbon nanotubes (CNTs) within epoxy networks on their ability to release. *Polymers*, *12*(11), 2530. https://doi.org/10.3390/polym12112530

Salas, A., Medina, C., Vial, J. T., Flores, P., Canales, C., Tuninetti, V., Jaramillo, A. F., & Melendrez, M. F. (2021). Ultrafast carbon nanotubes growth on recycled carbon fibers and their evaluation on interfacial shear strength in reinforced composites. *Scientific Reports*, *11*(1), 5000. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84419-y

Siddiqui, V. U., Sapuan, S. M., & Hassan, M. R. (2024). Innovative dispersion techniques of graphene nanoplatelets (GNPs) through mechanical stirring and ultrasonication: Impact on

morphological, mechanical, and thermal properties of epoxy nanocomposites. *Defence Technology*, *43*, 13-25. https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.04.018

Song, P., Liu, B., Liang, C., Ruan, K., Qiu, H. Y., Ma, Z., Guo, Y., & Gu, J. (2021). Lightweight, flexible cellulose-derived carbon aerogel@reduced graphene oxide/PDMS composites with outstanding EMI shielding performances and excellent thermal conductivities. *Nano-Micro Letters*, *13*(1), 91. https://doi.org/10.1007/s40820-021-00624-4

Tamayo-Vegas, S., Muhsan, A. A., Liu, C., Tarfaoui, M., & Lafdi, K. (2022). The effect of agglomeration on the electrical and mechanical properties of polymer matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes. *Polymers*, *14*(9), 1842. https://doi.org/10.3390/polym14091842

Tarhini, A. A., & Tehrani-Bagha, A. R. (2023). Advances in preparation methods and conductivity properties of graphene-based polymer composites. *Applied Composite Materials*, *30*(6), 1737-1762. https://doi.org/10.1007/s10443-023-10145-5

Teah, H. Y., Sato, T., Namiki, K., Asaka, M., Feng, K., & Noda, S. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions of long and pure carbon nanotubes synthesized via on-substrate and fluidized-bed chemical vapor deposition. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *8*(4), 1730-1740. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04542

Uthaman, A., Lal, H. M., Li, C., Xian, G., & Thomas, S. (2021). Mechanical and water uptake properties of epoxy nanocomposites with surfactant-modified functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Nanomaterials*, *11*(5), 1234. https://doi.org/10.3390/nano11051234

Zare, Y., Munir, M. T., & Rhee, K. Y. (2024). Assessment of electrical conductivity of polymer nanocomposites containing a deficient interphase around graphene nanosheet. *Scientific Reports*, *14*(1), 8737. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59678-0

Zhuang, Y., Zheng, K., Cao, X., Fan, Q., Ye, G., Lu, J., Zhang, J., & Ma, Y. (2020). Flexible graphene nanocomposites with simultaneous highly anisotropic thermal and electrical conductivities prepared by engineered graphene with flat morphology. *ACS Nano*, *14*(9), 11733-11742. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04456

## Anexo 1

*Identificación de los 24 estudios empíricos incluidos en la revisión sistemática (2020–2025)*

| N.º | Estudio | País | Eje temático | Sistema / nanorelleno | Enfoque metodológico |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Munir et al. (2020)** | Australia | Mecánica e interfaces | Mg / GNP (0,1–0,3 % en peso) | Experimental (matriz metálica) |
| 2 | **Salas et al. (2021)** | Chile | Mecánica e interfaces | CF reciclada / CNT (Poptube) | Experimental (tenacidad DCB) |
| 3 | **Han et al. (2021)** | China | Mecánica e interfaces | SIS / grafeno (enlaces π–π) | Experimental (elastómero) |
| 4 | **Evers et al. (2023)** | Estados Unidos | Mecánica e interfaces | Resina aeroespacial / >80 % en peso hilos CNT | Experimental (laminados) |
| 5 | **Du et al. (2024)** | China | Mecánica e interfaces | CF-PA6 / CNT silanizados | Experimental (interfase) |
| 6 | **Peng et al. (2025)** | China | Mecánica e interfaces | AFRP-epoxi / 2 % en peso MWCNT-g-HPEP | Experimental (envejecimiento) |
| 7 | **Zhuang et al. (2020)** | China | Conductividad eléctrica | PVA / grafeno plano (5–10 % en peso) | Experimental (anisotropía) |
| 8 | **Song et al. (2021)** | China | Conductividad eléctrica | PDMS / aerogel CCA@rGO (3,05 % en peso) | Experimental (blindaje EMI) |
| 9 | **Luo et al. (2021)** | Alemania | Conductividad eléctrica | PMMA / híbrido GNP + CNT / f-CNT | Experimental (percolación) |
| 10 | **Lee et al. (2022)** | Corea del Sur | Conductividad eléctrica | Polímero / MWCNT (relación de aspecto) | Experimental + modelo |
| 11 | **Zare et al. (2024)** | Irán* | Conductividad eléctrica | Polímero / grafeno (interfase deficiente) | Modelado analítico validado |
| 12 | **Gulahmadov et al. (2025)** | Azerbaiyán* | Conductividad eléctrica | Polisiloxano poroso / MWCNT | Experimental (TENG) |
| 13 | **Cortés et al. (2020)** | España | Dispersión y 3D | Resina fotocurable / CNT (impresión DLP) | Experimental (piezorresistivo) |
| 14 | **Uthaman et al. (2021)** | China* | Dispersión y 3D | Epoxi / MWCNT con surfactante (≤2 % en peso) | Experimental (absorción hídrica) |
| 15 | **Tamayo-Vegas et al. (2022)** | Reino Unido* | Dispersión y 3D | Polímero / CNT (0–5 % en peso) | Experimental + FEA/RVE |
| 16 | **Siddiqui et al. (2024)** | Malasia | Dispersión y 3D | Epoxi / GNP (0,1–0,5 % en peso) | Experimental (ultrasonicación) |
| 17 | **Mirzapour et al. (2024)** | Canadá | Dispersión y 3D | Epoxi / MWCNT, GNP o GO (0,4 % en peso) | Experimental (ruta sin solventes) |
| 18 | **Pradeep Kumar et al. (2025)** | India* | Dispersión y 3D | PLA / híbrido 1,5 % CNT + 0,5 % grafeno (FDM) | Experimental (impresión 3D) |
| 19 | **Teah et al. (2020)** | Japón | Escalabilidad y LCA | Síntesis CVD de CNT (sustrato vs. lecho fluidizado) | LCA aguas arriba (cadena CNT) |
| 20 | **Pras et al. (2020)** | Francia | Escalabilidad y LCA | Epoxi / CNT (buena vs. mala dispersión) | Experimental (liberación/tribología) |
| 21 | **Guo et al. (2021)** | China | Escalabilidad y LCA | TPU / grafeno alineado 3D (45 % en peso) | Experimental + modelado FEM |
| 22 | **Aznar Mollá et al. (2022)** | España | Escalabilidad y LCA | Poliéster / grafeno (lijado e intemperismo) | Aerosoles + ecotoxicidad/células |
| 23 | **Cetiner et al. (2023)** | Turquía | Escalabilidad y LCA | PLA-TPU / 0,5 % en peso GNP de neumáticos | Experimental (mezclado fundido) |
| 24 | **Habib et al. (2025)** | Malasia* | Escalabilidad y LCA | RPET-PA-11 / GNP (1–4 phr; inyección) | Experimental (economía circular) |

*Nota.* *Estudios con colaboración internacional multi-país; se reporta el país del primer autor. El estudio N.º 19 (Teah et al., 2020) se incluyó bajo el criterio complementario de análisis de ciclo de vida de la síntesis aguas arriba de CNT por su peso dominante en la huella ambiental y escalabilidad de compuestos reforzados con CNT.