

Posibilidades de nanocompuestos madera-plástico en el diseño de productos

Possibilities of wood-plastic nanocomposites in product design

Alejandra Montes-Villagrán¹, Santos Adriana Martel-Estrada¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Los compuestos de madera-plástico han sido objeto de interés por parte de investigadores por sus propiedades mejoradas, en comparación con los productos basados únicamente en plástico o madera. Sin embargo, durante algunos años se han estudiado los efectos de algunos nanorrellenos sobre estos compuestos. La presente investigación tiene como objetivo la revisión de las investigaciones más relevantes en trabajos publicados en revistas científicas sobre los efectos de los nanorrellenos en los compuestos de madera y plástico. El material bibliográfico consultado se encuentra entre los años 2011 y 2021. En este estudio se discuten los beneficios ambientales, la limitación de las aplicaciones y los efectos de algunas nanopartículas en estos compuestos con plástico virgen y reciclado. Se concluye que los nanocompuestos de madera-plástico son una excelente opción de material con aplicaciones potenciales. No obstante, se sugiere visualizar las alternativas que existen para el uso de nanocompuestos madera-plástico en el diseño de producto.

PALABRAS CLAVE: nanocompuestos; compuestos madera-plástico; diseño de producto.

ABSTRACT

Wood-plastic composites have been the subject of interest from researchers for their improved properties compared to products based solely on plastic or wood. However, the effects of some nanofillers on these composites have been studied for some years. The present research aims to review the most relevant research in works published in scientific journals on the effects of nanofillers in wood-plastic composites. The bibliographic material consulted was published between 2011 and 2021. This study discusses the environmental benefits, the limitation of its applications, and some nanoparticles' effects in these composites with virgin and recycled plastic. It is concluded that wood-plastic nanocomposites are an excellent material option with potential applications. Nevertheless, it is suggested to visualize the alternatives for the use of wood-plastic nanocomposites in product design.

KEYWORDS: nanocomposites; wood-plastic composites; product design.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Santos Adriana Martel-Estrada
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro 450 norte, col. Partido Romero,
C. P. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: adriana.martel@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de abril de 2021. **Fecha de aceptación:**
10 de noviembre de 2021. **Fecha de publicación:** 8 de diciembre
de 2021.



I. INTRODUCCIÓN

Los compuestos de madera y plástico, denominados en inglés Wood-Plastic Composites (WPC), son aquellos que contienen elementos a base de madera, como tablonés, chapa, fibras o partículas que son combinados con una matriz polimérica para crear un material compuesto [1]–[3], es decir, es la combinación de elementos de madera con polímeros termoestables o termoplásticos [1]. Estos compuestos se han desarrollado exitosamente como materiales de ingeniería, con importantes aplicaciones en la construcción, sector automotriz, empaques y materiales de decoración [4], [5]. La participación de mercado de los WPC ha crecido anualmente alrededor del 3 % a partir de 2012 [6], [7] y la tendencia continúa en aumento [8].

Estos compuestos son preparados utilizando partículas de desecho de la madera en una matriz polimérica mediante diferentes métodos de fabricación, como extrusión, compresión, moldeo por inyección e impresión 3D [9].

La importancia de los compuestos madera-plástico radica en que son materiales amigables con el medio ambiente siempre y cuando los componentes sean renovables, además de que han mostrado un gran desempeño debido a sus propiedades mejoradas y costos reducidos en relación con otros materiales con propiedades similares. Por ejemplo, un tablón para piso de exteriores puede ser conseguido en 18 dólares estadounidenses el metro cuadrado [10], mientras que un piso de bambú costaría 67 dólares [11]. La diferencia de precio entre ambos productos es de 372 %. Comparados con la madera, los WPC muestran una gran resistencia y dureza; niveles bajos de costo, densidad y emisiones de CO₂; durabilidad; biodegradabilidad, y además requieren un mantenimiento mínimo, absorben menos humedad, poseen una gran estabilidad dimensional y mayor resistencia a la degradación y desgaste biológicos [4], [12], [13].

La madera es un compuesto rico en celulosa, hemicelulosa y lignina [9]. El material utilizado en estos compuestos proviene del aserrín producido durante la fabricación de madera y sus productos, y es una opción mucho más económica para producir que el plástico (Figura 1). La industria de madera genera del 45-52 % de residuos en forma de harina o aserrín [9]. Esto hace que el costo de los WPC sea más bajo para los consumidores [14]. Por lo tanto, la madera es utilizada con frecuencia en plásticos

como una forma de reducir el costo en comparación con un producto completamente plástico. Asimismo, la madera —así como las fibras naturales en general— es un material biodegradable, de baja densidad, de naturaleza abrasiva baja, gran resistencia y un alto módulo de elasticidad [15], propiedades que finalmente son conferidas a los compuestos de madera-plástico.



Figura 1. Ciclo de vida de la madera de la cuna a la fábrica (*cradle-to-gate*). Fuente: Elaboración propia, de acuerdo con las normas EN 15804 y EN 16485, adaptada de Sommerhuber *et al.* [16].

Los polímeros juegan un rol muy importante en estos compuestos por sus propiedades versátiles, su manufacturabilidad, bajo peso, resistencia a la rotura y bajo costo, y estos pueden ser combinados con una gran variedad de materiales para mejorar sus propiedades. Sin embargo, se conoce que la adhesión entre la matriz polimérica y las fibras naturales ha resultado ser pobre, por lo que se recurre al uso de agentes que mejoren su compatibilidad. La incorporación de estos agentes puede mejorar la adhesión interfacial, reduce los espacios y bloquea los grupos hidrófilos en la madera, además de reducir notablemente la absorción de humedad del compuesto madera-plástico [13].

Se ha utilizado el polipropileno anhídrido maleico (MAPP) como agente acoplador, ya que promueve el enlace químico con la superficie de las fibras y los grupos hidroxilos disponibles, creando la interacción necesaria en la interfaz del material compuesto [17]. De la misma manera, se ha usado la montmorillonita con harina de soya termoquímicamente modificada a manera de adhesivo. Este material compuesto permitió una buena dispersión y es un material compuesto con un adhesivo más amigable con el medio ambiente [18].

Los residuos plásticos tienen efectos catastróficos sobre el ecosistema entero y su eliminación ha producido preocupación en el mundo. Se estima que tan solo en Canadá se generan cada año más de 750 000 toneladas de residuos de avena. El uso de estos residuos con polímeros biodegradables para producir materiales verdes podría agregar valor a los agrorresiduos [19]. En el mismo

tenor se encuentra la madera, que genera, al ser procesada, toneladas de residuos sólidos que son abandonados o quemados como un combustible de bajo valor. La incineración de la harina de madera para generar energía no solamente representa un combustible de bajo valor, sino que produce esmog secundario sumamente dañino [2]. Reciclar y reutilizar es uno de los procesos para reducir la contaminación ambiental, siendo este último uno de los objetivos principales de los compuestos de madera-plástico (Figura 2), pues tan solo un fabricante de puertas hechas con WPC previene anualmente la destrucción de tres millones de árboles [20]. Del mismo modo, los residuos de madera como reforzadores de materiales compuestos podrían realizar una importante contribución al reciclado y reducción de emisiones de CO₂ [21].

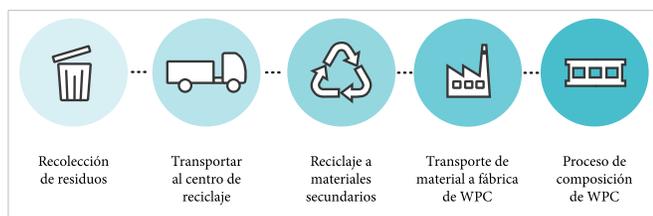


Figura 2. Ciclo de vida de material reciclado de la cuna a la fábrica (*cradle-to-gate*). Fuente: Elaboración propia, de acuerdo con las normas EN 15804 y EN 16485, adaptada de Sommerhuber *et al.* [16].

En los compuestos madera-plástico comerciales, el contenido de harina de madera se encuentra en el rango del 50-60 % [2], [22]. Sin embargo, a pesar de las ventajas de los WPC, su uso está limitado a técnicas de manufactura convencionales, como extrusión, compresión y moldeo por inyección [23].

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos madera-plástico dependen de las propiedades de las partículas de madera, de los polímeros, de las concentraciones de las partículas, la geometría de las partículas, adhesión interfacial, compatibilidad y humedadabilidad (Tabla 1) [9]. La compatibilidad interfacial de los enlaces entre el polímero y el relleno de madero son indispensables para lograr una adecuada integración de propiedades [22].

Los biocompuestos con madera o fibras naturales son considerados una alternativa de materiales sustentables con una baja huella ambiental y una reducida huella de carbono, ofreciendo materiales funcionales para la industria mueblera, instrumentos musicales, juguetes, peines y bandejas, entre otros [24].

TABLA 1
GEOMETRÍA Y PROPIEDADES EVALUADAS DE LA MADERA UTILIZADA EN LOS MATERIALES COMPUESTOS

MATERIAL COMPUESTO	PORCENTAJE DE RESIDUOS DE MADERA	GEOMETRÍA DE LA MADERA	PROPIEDADES EVALUADAS	FUENTE
Polipropileno (PP) / madera	30 %	Polvos y fibras	Las propiedades mecánicas de los polvos demostraron una mejora del Módulo de Young vs. la matriz pura del 84 % y un 14 %.	[21]
Madera de álamo y polietileno de alta densidad con nanomontmorillonita	45-50 %	Fibras	Las propiedades mecánicas del compuesto aumentaron con el incremento de silano y del nanomontmorillonita, obteniendo valores máximos de 38.1 MPa y 60.8 MPa.	[25]
Harina de madera con celulosa y de celulosa con lignina	20-40 %	Nanofibras	Se elaboraron contenedores de alimentos con valores del Módulo de Young mejores que los de contenedores comerciales de cartón, aumentando todavía más con contenido de lignina.	[26]

Una alternativa a este remplazo de materiales es la utilización de nanotecnología. La incorporación de nanopartículas como relleno reforzador es un método para mejorar las propiedades generales de los compuestos de madera-plástico [27]. Las nanopartículas son estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros que pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales [28] y han sido utilizadas debido a sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas [29]. Los nanorrellenos más utilizados actualmente son las nanoarcillas y nanotubos de

carbono sintéticos, sin embargo, el uso de óxidos a nanoescala ha aumentado debido a que estos químicos no son costosos, están frecuentemente disponibles y son termoestables y amigables con el medio ambiente [30].

Los materiales compuestos madera-plástico son apropiados para diferentes aplicaciones. No obstante, tienen algunas desventajas, como la absorción de agua, la vulnerabilidad al fuego, el deterioro por hongos y el ataque de insectos y termitas, por lo que las nanopar-

tículas pudieran ofrecer alternativas para mejorar estas propiedades [31].

Por lo tanto, el objetivo de este artículo de revisión es proveer un estado del arte sobre los estudios que se han realizado a lo largo de la última década sobre compuestos de madera y plástico reforzados con diferentes nanopartículas.

II. METODOLOGÍA

Esta revisión sistemática de la literatura relacionada con nanocompuestos madera-plástico fue desarrollada como lo indica la Figura 3. La revisión fue desarrollada utilizando las siguientes palabras de búsqueda: *wood plastic composite*, *nano wood plastic composite*, *nanoparticle wood plastic composite* en título, *abstract* o palabras clave. La investigación fue desarrollada en las bases de datos Science Direct, Springer Link, Ebsco y Google Scholar. La búsqueda fue desarrollada en inglés debido a que en español no se obtenían resultados relevantes. Se analizaron 110 artículos, libros o capítulos de libros.

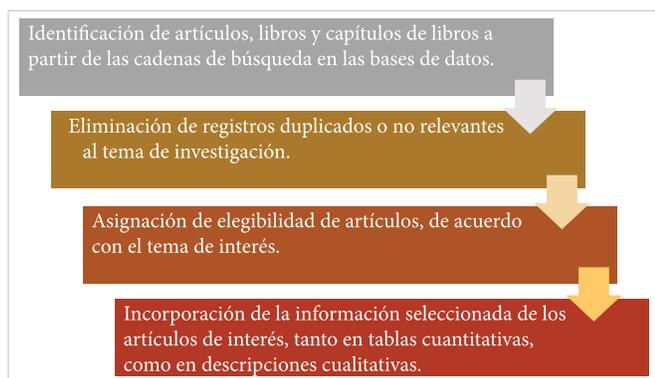


Figura 3. Diagrama de flujo de la revisión de literatura implementada.

Con relación al análisis de ciclo de vida y los compósitos madera-plástico, se incluyó en la búsqueda *ecological*, *life cycle assessment* y *LCA*, obteniendo dos artículos en donde reportan casos relevantes, lo que implica un área de oportunidad para investigaciones experimentales y teóricas posteriores. A pesar de que existe un número importante de publicaciones relacionadas con compósitos madera-plástico, el uso de nanopartículas ha sido reportado en menor cantidad, encontrando solo 48 referencias. Por este motivo, se seleccionaron las publicaciones de los últimos diez años, con la finalidad de tener un estado del arte exhaustivo que las considerara. Para la selección de estos artículos o libros, se utilizaron los criterios mencionados en la Tabla 2.

TABLA 2
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN EMPLEADOS PARA LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

CRITERIOS DE INCLUSIÓN	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN
Títulos publicados entre los años 2011 al 2021.	Publicaciones previas al 2011.
Publicaciones en el idioma inglés.	Artículos publicados en otros idiomas.
Publicaciones relacionadas a los nanocompuestos madera-plástico y compuestos madera-plástico.	

III. NANOPARTÍCULAS Y ÓXIDOS METÁLICOS EN COMPUESTOS DE MADERA-PLÁSTICO

En los compuestos poliméricos, diferentes tipos de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos son ampliamente utilizados para mejorar las propiedades térmicas y mecánicas, entre otras (Figura 4). Principalmente, han sido utilizadas cuatro tipos de nanopartículas: Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 y ZrO_2 [32].

Ye [33] utilizó porcentajes del 1 al 4 % de nano-óxido de zinc debido a que es un material de bajo costo, no tóxico, con alta estabilidad química y que tiene la habilidad de absorber la radiación UV en un compósito madera-PP, en donde se mejoraron las propiedades mecánicas de un 43 % a un 90 %, conduciendo también a una viscoelasticidad y estabilidad térmica mejoradas. Kiaei *et al.* [34] demostraron que las nanopartículas de óxido de zinc mejoraron las propiedades mecánicas, morfológicas y de inflamabilidad de un compuesto de madera y polietileno de alta densidad, el primero utilizado como relleno del compuesto.

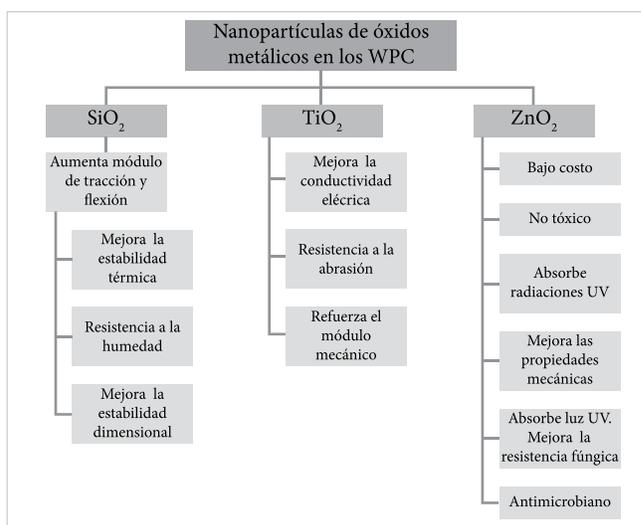


Figura 4. Propiedades de óxidos metálicos usados en WPC.

Farahani y Banikarim [35] produjeron un compuesto de álamo (*Populus deltoides*), PP, polietileno/anhídrido maleico y nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), y comprobaron la efectividad de estas últimas en la biodegradación del compuesto madera-plástico. Al final de este estudio, los investigadores confirmaron que, efectivamente, las nanopartículas de óxido de zinc mejoraron considerablemente la resistencia a la descomposición del compuesto contra hongos. Rasouli *et al.* [36] realizaron otro estudio con nanopartículas de óxido de zinc para analizar sus efectos como estabilizadores UV sobre el comportamiento a la intemperie de un compuesto de harina de madera de haya y polietileno de alta densidad (HDPE), el cual obtuvo resultados positivos, pues el uso de nanopartículas de óxido de zinc en la estructura del WPC disminuyó la degradación de la superficie durante la intemperie, evidenciada al observar una menor formación de grietas, pérdida de resistencia a la tracción y cambios en el ángulo de contacto. Estas nanopartículas también absorbieron una amplia gama de radiación UV y limitaron el deterioro de las cadenas de polímero ubicadas en el límite de las partículas de ZnO, especialmente en la superficie del compuesto. Asimismo, produjeron radicales libres, lo que provocó la oxidación del polímero y la formación de carboxilato de zinc.

Dang *et al.* [37] fabricaron un compuesto de fibras de madera con polietileno y nanopartículas de ZnO para comprobar si existe una alteración en la absorción de microondas y actividad fotocatalítica mediante un sencillo método de prensado en caliente. El estudio demostró que este nanocompuesto poseía propiedades de mayor absorción de microondas y propiedades mecánicas superiores; además, podía degradar el MO bajo la irradiación UV.

Bazant *et al.* [38] modificaron un compuesto de harina de madera BK 40-90 y policloruro de vinilo (PVC) plastificado con nanopartículas de plata (Ag) y ZnO nanoestructurado con la finalidad de conferir propiedades antimicrobianas contra bacterias patógenas humanas a la superficie del nanocompuesto. En esta investigación se destacó que la harina de madera no se utilizó como relleno de refuerzo (como comúnmente se utiliza en los compuestos de madera-plástico), sino como vehículo para el relleno nanoestructurado híbrido de Ag/ZnO. El artículo no hace mención de estudios de biocompatibilidad, pero sí concluye que los resultados obtenidos por los investigadores prueban la posibilidad de obtener materiales con excelentes propiedades antimicrobia-

nas con el potencial de uso médico o higiénico, incluso siendo WPC. No obstante, debido a estos resultados sería relevante estudiar las propiedades de biocompatibilidad de los WPC.

Masoudifar *et al.* [39] estudiaron los efectos de las nanopartículas de dióxido de titanio sobre la elasticidad y morfología de los nanocompuestos de harina de mezclas de madera dura y PP. Para eliminar la incompatibilidad entre los compuestos, se utilizó MAPP. Al añadir nanopartículas de TiO₂, hubo un incremento en módulos y en la fuerza de flexión y tracción, sin embargo, al sobrepasar cierta cantidad de estas nanopartículas podría causar una aglomeración, comprometiendo las fuerzas mecánicas y de impacto del material. Kaymakci [40] también estudió los efectos del dióxido de titanio en algunas propiedades mecánicas, térmicas y superficiales en un nanocompuesto de harina de madera de pino amarillo y PP, utilizando PP anhídrido maleico como compatibilizador. Al finalizar, se concluye que las propiedades de flexión y tracción del nanocompuesto de madera-plástico mejoraron al incrementar cantidades de TiO₂, además de que hubo un aumento de ceniza residual en porcentaje de peso, mejorando de un 11 a un 20 % en peso y mejor estabilidad térmica. Asimismo, se concluye que con el incremento de TiO₂ se redujo la rugosidad de la superficie del material.

Farsi [41] desarrolló un compuesto de madera y corteza de haya y HDPE modificado con nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂). La adición de este mejoró el módulo elástico, la fuerza de tracción del nanocompuesto y la resistencia al impacto (para un porcentaje de SiO₂ adecuado). No obstante, el óxido de zinc aumentó la absorción del agua y la hinchazón de la madera. Por esto, Farsi empleó una mayor cantidad de harina de corteza de haya para contrarrestar estos efectos no deseados en el nanocompuesto. El-Bashir [42] utilizó SiO₂ a nanoescala sobre un compuesto de madera-plástico, el cual se compuso específicamente de estireno y fibras de palmera, usando como solvente peróxido de benzoilo. A bajas concentraciones de nanosílice, se encontró que las fibras de celulosa estaban bien adheridas y distribuidas uniformemente dentro de la matriz nanocompuesta de PS/SiO₂. Además, mejoró su desempeño mecánico, resistencia a la abrasión y la absorción de agua del compuesto. Liu *et al.* [43] realizaron pruebas con estabilizadores ligeros sobre un compuesto de polietileno de alta densidad como matriz polimérica y harina de madera de álamo por medio de la tecnología de co-extrusión

con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y antienviejimiento ultravioleta. Uno de estos estabilizadores consistió en SiO_2 a nanoescala. Los investigadores concluyeron que, efectivamente, el nano SiO_2 mejora notablemente las propiedades antienviejimiento por UV del compuesto, mientras que sus propiedades mecánicas no se vieron afectadas. Devi & Maji [44] también emplearon SiO_2 a nanoescala para mejorar algunas propiedades de un compuesto de madera de ceiba, estireno acrilonitrilo y nanoarcilla. Se reportó que la incorporación de nanoarcilla y nanosílice dentro de la madera mostró una buena estabilidad térmica y resultó en una estructura exfoliada. Asimismo, se observó una mejora máxima en las propiedades de flexión y de tracción, absorción de agua, estabilidad dimensional y en el valor del LOI (*limiting oxygen index*).

Ye *et al.* [45] realizaron un material compuesto con PP ensamblando fibras de madera con nano-óxido de silicio. Los esfuerzos de tensión y de flexión, así como la temperatura de transición vítrea, fueron enfatizados por la fuerte adhesión superficial entre las fibras. Con porcentajes del 3.60 % se mejoró la resistencia al agua y a la luz ultravioleta, mientras que el esfuerzo de tensión mejoró al 173 % con respecto al valor del módulo del producto original. Por otro lado, Zhou, *et al.* [46] realizaron un WPC reforzado con nanopartículas de óxido de silicio. De acuerdo con este estudio, el material compuesto polietileno de alta densidad/madera mejoró el esfuerzo mecánico en un 10 %, comparado con el material compuesto sin nanopartículas.

Mashkour y Ranjbar [47] demostraron que la magnetita ($\text{Fe}_3\text{O}_4@$) a nanoescala tiene efectos sobre los módulos mecánicos de un compuesto de harina de madera de álamo y PP por medio de un estudio con algunos especímenes, en donde la cantidad de harina de madera virgen (VWF) y harina de madera con magnetita (MWF) varían. Se encontró la sustitución completa de VWF con la MWF incrementó la absorción de agua y la hinchazón del espesor del compuesto superparamagnético. Los investigadores mencionan que, comparado con las propiedades mecánicas, las propiedades físicas de los WPC superparamagnéticos se vieron más influenciados por los aumentos en proporción de la MWF. Las resistencias de flexión y de tracción se incrementaron al usar cierta cantidad de harina de madera con FeO_4 . No obstante, los aumentos en la relación en peso de los MWF disminuyen la interfaz entre el relleno y la matriz y aumentan considerablemente el tamaño de las

microfisuras dentro de la estructura de las muestras de prueba.

Samariha y Bazyar [48] estudiaron los efectos del nanosílice y el hidróxido de aluminio sobre las propiedades térmicas, inflamables y morfológicas de nanocompuestos hechos de polietileno de alta densidad reciclado y harina de cartón corrugado reciclado. Se mostró una mejora en la estabilidad térmica y de la pérdida de ignición al aumentar la cantidad de nanosílice sobre el nanocompuesto. Asimismo, se mostró que la nanosílice produjo mayor compatibilidad y proporcionó un mejor vínculo entre la fibra y la matriz polimérica.

IV. NANOPARTÍCULAS CERÁMICAS EN COMPUESTOS DE MADERA-PLÁSTICO

La nanoarcilla ha sido utilizada como un compatibilizador, logrando mostrar que su inclusión en los composites madera-plástico proporciona una mejora en las propiedades térmicas de los compuestos. Es decir, se logra que el PP se oxide y actúe como un aislante, previniendo el éxodo de energía durante la combustión. Del mismo modo, la velocidad de degradación térmica permitió una difusión en el oxígeno y una mejor efusión de gases, previniendo la descomposición volátil de gases (Figura 5) [49]. Este tipo de nanoarcillas ha mostrado beneficios contra el crecimiento de hongos. De esta manera, Bari *et al.* [50] estudiaron los efectos de la nanoarcilla en la resistencia biológica de los compuestos de madera-plástico contra cinco hongos que deterioran la madera. El material se elaboró con PP, harina de madera de álamo (*Populus nigra*), polietileno injertado con anhídrido maleico como compatibilizador y nanoarcilla en porcentajes del 2 al 6 % del peso. Este último resultó tener efectos antifúngicos en ciertos porcentajes y redujo la absorción del agua en la madera.

De igual forma, Nafchi *et al.* [49], [51] llevaron a cabo un experimento con partículas de nanoarcilla, mezcla de fibras naturales y PP, usando PP oxidado como compatibilizador. En este estudio se demuestra la mejora de la estabilidad del compuesto madera-plástico contra altas temperaturas. Durante el experimento, el polipropileno oxidado empezó su descomposición a los 290 °C, mientras que el polipropileno virgen lo hizo a 250 °C. Se resalta que el propileno oxidado —en comparación con el PP crudo— muestra mayor estabilidad contra el incremento de temperatura y también libera menos energía durante la degradación térmica.

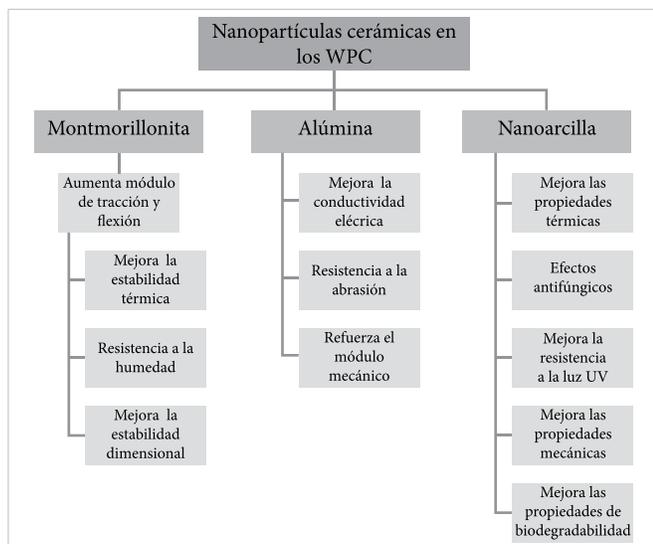


Figura 5. Propiedades de cerámicas usadas en WPC.

Del mismo modo, dado que uno de los principales usos de los WPC son exteriores, se evaluaron los efectos de exposición a luz UV de nanocompuestos de polietileno, harina de madera y nanoarcilla. A través de una exposición de 2000 h a radiación UV se simularon los efectos de exposición a luz solar. Los resultados de esta investigación mostraron que la absorción de agua aumentaba después de la exposición a luz UV, pero la nanoarcilla reducía la intensidad de este efecto. No obstante, la nanoarcilla disminuyó ligeramente los módulos de elasticidad con porcentajes de 2 % de peso de nanoarcilla [52].

Kaymakci [53] reportó que las nanofibras de arcilla de sepiolita tienen efectos sobre las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de un nanocompuesto de madera y plástico. Encontró que al incrementar la cantidad de nanofibras de arcilla de sepiolita en un nanocompuesto de PP y harina de madera de pino amarillo mejoró las propiedades de flexión y tensión, y redujo el hinchamiento de espesor y la absorción de agua del material.

Golmakani *et al.* [54] encontraron que la nanoarcilla refuerza las propiedades mecánicas de un compuesto de polietileno y harina de madera. Asimismo, la inclusión de estas nanopartículas de arcilla poseen un efecto significativo en las propiedades físicas del material.

Alosaimi *et al.* [55] encontraron que dos tipos de nanoarcilla —específicamente halloysita y bentonita— modificadas mediante una reacción de intercambio iónico con diferentes tensioactivos mejoraron las propiedades de tracción y flexión de un nanocompuesto de harina de madera de haya y polisulfona disuelta en cloroformo.

Seo *et al.* [56] demostraron que la utilización de nanoarcilla y fibra de vidrio en un compuesto reciclado de madera, PP y polietileno tiene efecto sobre las propiedades microestructurales, mecánicas, térmicas y de absorción de agua, pues mejoró la unión interfacial entre la matriz polimérica y los rellenos del compuesto. También aumentó la resistencia de flexión y tracción, mientras que otorgaron estabilidad térmica al compuesto.

Deka *et al.* [57] produjeron un material nanocompuesto de una mezcla plástica con residuos plásticos de HDPE, polietileno de baja densidad (LDPE), PP y PVC, y madera de carrizo (*Phragmites karka*) reforzado con nanoarcilla modificada con octadecilamina y aminopropiltriétoxisilano. Los investigadores encontraron que la arcilla mejoró la estabilidad térmica, las propiedades mecánico-dinámicas del compuesto y su biodegradabilidad, sin embargo, las propiedades de flexión y tracción se vieron afectadas debido a la degradación bacteriana de los compuestos.

Nemati *et al.* [58] encontraron que la nanoarcilla a base de montmorillonita natural reduce la ignición potencial y evita la liberación de gases volátiles e inflamables de los poros a la superficie de un compuesto de poliestireno reciclado y harina de madera de abeto. Además, al incrementar la cantidad de nanoarcilla al compuesto, se redujo la porosidad de este.

Se han utilizado nanopartículas de alúmina como reforzadores de polímeros para resinas dentales y aislantes epóxicos eléctricos. Con concentraciones pequeñas de 5 % del peso de madera, se mejora el esfuerzo mecánico, resistencia a la abrasión, conductividad térmica y resistencia eléctrica [59]. Alabduljabbar *et al.* [60] utilizaron nanopartículas de alúmina para el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de un panel de madera de densidad media. En este estudio se pudo lograr una mejora significativa en las propiedades físicas y mecánicas. A concentraciones bajas de un 3 a 4.5 % de alúmina, se obtuvieron aumentos en los módulos de elasticidad.

Kord y Tajik [61] también encontraron que se aumentó el tiempo de propagación del sonido y la absorbancia de la energía del sonido de los compuestos con la adición de la montmorillonita organomodificada a un compuesto de PP y harina de madera. El módulo de tracción incrementó al agregar MTOM, sin embargo, al exceder cierta cantidad este módulo disminuyó.

Meng *et al.* [62] demostraron que el uso de montmorillonita natural modificada con sal cuaternaria de amonio a nanoescala modifica las propiedades mecánicas y térmicas de un nanocompuesto de ácido poliláctico (PLA) y harina de maple. Esta nanoarcilla aumentó el módulo de tracción, disminuyó considerablemente la velocidad de la descomposición térmica y cambió la velocidad máxima a una temperatura más alta. No obstante, la adición de la nanoarcilla comprometió propiedades como la fuerza de impacto y la adhesión entre la harina de madera y la matriz PLA, pues las partículas de arcilla causan poros en algunas partes del PLA que debilitan las propiedades mecánicas. Zahedi *et al.* [63] también experimentó con montmorillonita natural. Sin embargo, en este caso se trabajó con montmorillonita natural modificada con dimetil, sal de amonio cuaternario de sebo deshidrogenado como refuerzo de un nanocompuesto de PP y harina de cáscara de almendras. El estudio mostró que la montmorillonita natural mejoró las propiedades de flexión y tracción, disminuyó la absorción del agua y la hinchazón de espesor del material y resultó ser de gran apoyo para la adhesión entre los compuestos, pues se redujo el número de cavidades —además, se demuestra que la harina de cáscara de almendra mejora considerablemente las propiedades del nanocompuesto—.

Kord *et al.* [64] investigaron la influencia de un agente espumante químico a base de CBA exotérmico sobre las propiedades elásticas y morfológicas de un compuesto de HDPE y harina de madera, reforzado con montmorillonita modificada con un sebo dimetil-deshidrogenado, amonio cuaternario con un arcilla. Se demostró una mejora en el módulo de tracción, la humedabilidad y el hinchamiento del espesor de los compuestos con una mayor carga de nanoarcilla. No obstante, un aumento en la concentración del agente espumante y la nanoarcilla causó un efecto contrario en muchos casos.

Con respecto al uso de nanopartículas cerámicas en compuestos de madera-plástico reciclado, Danesh *et al.* [65] mostraron que la nanoarcilla tuvo efectos positivos sobre la elasticidad, morfología y propiedades térmicas del PP reciclado y residuo de periódico como relleno. Con la adición de la nanoarcilla al compuesto reciclado, se incrementaron el módulo de tensión, la resistencia a la tensión, y la temperatura de descomposición al 90 % de su pérdida de peso; sin embargo, el efecto de la nanoarcilla sobre todas las propiedades del nanocompuesto fue más potente en muestras que se hicieron con PP virgen.

Kord [66] estudió los efectos del silicato en nanocapas sobre las propiedades físicas y mecánicas de un compuesto de PP y bagazo. En esta investigación se encontró que las nanocapas de silicato incrementan el módulo de tracción y de flexión del nanocompuesto. Sin embargo, la resistencia al impacto y la absorción de agua disminuyeron con un incremento de las nanocapas de silicato. Asimismo, las propiedades físicas y mecánicas mejoraron con la adición de anhídrido maleico al nanocompuesto.

V. NANOPARTÍCULAS BASADAS EN CARBONO EN COMPUESTOS DE MADERA-PLÁSTICO

El carbono es un elemento único y muy versátil que es capaz de formar diferentes arquitecturas a nanoescala. En esta era de investigación de nanocompuestos, han surgido nuevos materiales a base de carbono a nanoescala y se prevé que surgirán más [67]. De esta manera, han sido utilizadas diferentes partículas basadas en carbono para aprovechar sus propiedades a nanoescala en WPC (Figura 6).

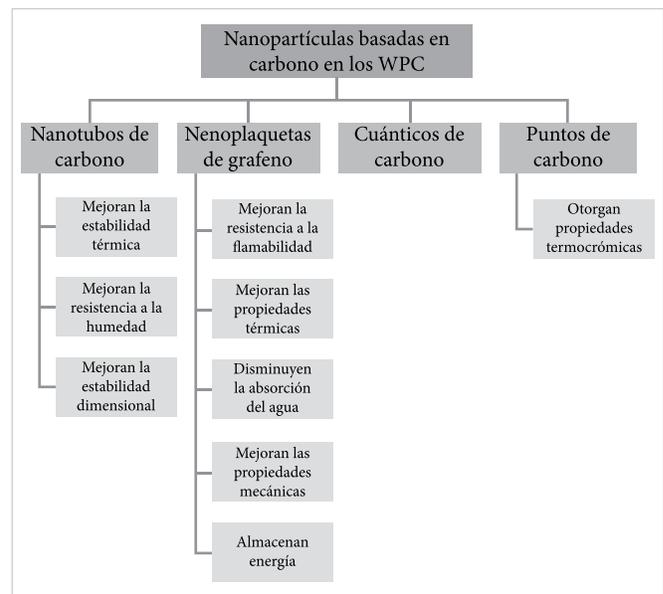


Figura 6. Propiedades de partículas basadas en carbono usadas en WPC.

Ge *et al.* [68] descubrieron el uso potencial de diferentes tipos de carbón en la producción de un compuesto de pino deteriorado y PVC. Se utilizaron los nanotubos de carbono, nanomaterial que resultó proporcionar una mejor degradación térmica que un compuesto de madera-plástico normal.

Sheshmani *et al.* [69] estudiaron las nanoplaquetas de grafeno como agentes de refuerzo en las propiedades elásticas de los compuestos de madera y plástico. El material consistió en harina de madera de álamo (*Populus deltoides*), PP y polvo de nanoplaquetas de grafeno de grado AO-4. La incorporación de estas nanoplaquetas mejoró las propiedades mecánicas (como el incremento de la fuerza de tracción), disminuyeron la absorción del agua (y, por ende, la hinchazón de la madera) y, finalmente, las temperaturas de degradación cambiaron a valores más altos. Por otro lado, se ha utilizado óxido de grafeno como nanorrelleno en una matriz de almidón de madera, mejorando las propiedades mecánicas, térmicas, resistencia a la flamabilidad y al agua [70].

Kord y Roohani [71] encontraron que la adición de nanotubos de carbono (CNT) mejoró la resistencia al agua y estabilidad dimensional de un nanocompuesto de fibras de cartón corrugado reciclado y HDPE, utilizando polipropileno anhídrido maleico como compatibilizador debido al efecto de barrera de los nanotubos de carbono, el cual inhibe la penetración del agua al material. Además, el hinchamiento del material fue menor al incrementar la cantidad de nanotubos de carbono.

Farsheh *et al.* [72] realizaron una investigación sobre las propiedades mecánicas y morfológicas de nanocompuestos espumados a base de PVC, harina de madera de álamo y de nanotubos de carbono multipared (MWCNT) como refuerzo. También se utilizó un agente espumante químico exotérmico, y finalmente, óxido de zinc como catalizador para disminuir la temperatura de descomposición del agente espumante químico. Los investigadores encontraron que la densidad celular de la espuma de madera-plástico aumentó en presencia de los CNT, mientras que el tamaño celular disminuyó. La densidad, la absorción de agua e hinchazón del espesor de las muestras espumadas decrecieron con la adición de los nanotubos de carbono. También, aumentó la resistencia a la tensión y al módulo de tensión del nanocompuesto.

Ashori *et al.* [73] demostraron que el uso de los MWCNT también mejoraron las propiedades físicas y mecánicas sobre un compuesto de harina de bagazo y HDPE. Ayrimis y Kaymakci [74] reforzaron un nanocompuesto de harina de álamo y PP con MWCNT y reportaron que estos mejoraron la resistencia, el módulo y la estabilidad térmica del nanocompuesto. Zhang *et al.* [75] reportaron los efectos de un tratamiento de microondas en las propiedades de flexión de un material compuesto madera-plástico con nanotubos de carbono. El com-

puesto fue elaborado con polvos de madera de pino y poliéster sulfona. El tratamiento de microondas permitió mejorar el esfuerzo mecánico del material hasta un 64 % por medio de una mejora de la flexión interfacial entre la matriz polimérica y el polvo de madera.

Por otro lado, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto, se han preparado nanocompuestos con almidón de madera utilizando nanotubos de pared múltiple, con lo que se mejoró las propiedades térmicas, mecánicas, flamabilidad y resistencia al agua [70]. Liu *et al.* [76] desarrollaron un material compuesto fluorescente termocrómico basado en puntos de carbono de agregación inducida para una conversión y almacenamiento de energía solar térmica. En este sentido, Zhou *et al.* [1] desarrollaron un material compuesto de polvos de madera con poliuretano (PU), dopado con nano hojas de óxido de grafeno para el almacenamiento de energía.

VI. NANOPARTÍCULAS MIXTAS EN COMPUESTOS DE MADERA-PLÁSTICO

Deka *et al.* [77] encontraron que nanopartículas de ZnO, SiO₂ y nanoarcilla modificada con octadecilamina y aminopropiltriétoxosilano tienen efectos sobre un compuesto de harina de caña tropical (*Phragmites karka*) y de una mezcla polimérica de residuos de HDPE, LDPE, PP y PVC, mejorando sus propiedades mecánicas, térmicas, su dureza y reduciendo la capacidad de absorción de agua. Los materiales de nanocelulosa están siendo utilizados debido a su biodegradabilidad, renovabilidad, baja densidad, larga área de superficie específica y resistencia a la grasa y aceite [26]. Se ha utilizado polietilenina con nanopartículas de celulosa ricas en grupos hidroxilo, para la separación de metales pesados. De igual manera, se han elaborado materiales compuestos con 1-tetradecanol con propiedades hidrofóbicas [2]. Bisht *et al.* [78] elaboraron un compuesto madera plástico transparente utilizando resina epóxica dopada con un absorbente de luz UV, que a pesar de lo anterior requiere otro estabilizador para evitar su degradación en usos de exteriores.

Zhou *et al.* [1] utilizaron un material compuesto con polietilenoimina con montmorillonita y nanotubos de carbono grafitizados que fueron depositados en ensamblaje capa por capa con la finalidad de proveer barrera térmica y de gases para prevenir la flamabilidad.

VII. COMPUESTOS MADERA-PLÁSTICO EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS

El uso de los compósitos madera-plástico responde principalmente al aumento del costo de los plásticos, así como a la necesidad ambiental de utilizar materiales renovables y biodegradables [79]. Los usos comerciales de los WPC se han incrementado, remplazando muchos productos (Figura 4), especialmente en aplicaciones para exteriores [80], como mesas para día de campos y bancos, materiales para construcción [81], decoración de interiores, productos de arquitectura de jardines [82], marcos para puertas y ventanas, macetas, techos, gabinetes para aparatos electrónicos, empaques para la industria alimenticia, sensores basados en papel, industria médica y muebles [9]. Actualmente, con la incorporación de harina de madera y polímero, se utilizan en la fabricación de cocinas modulares, tabiques, muebles de oficina, paneles de pared, techo, ventanas, etc. (Figura 7) [83].

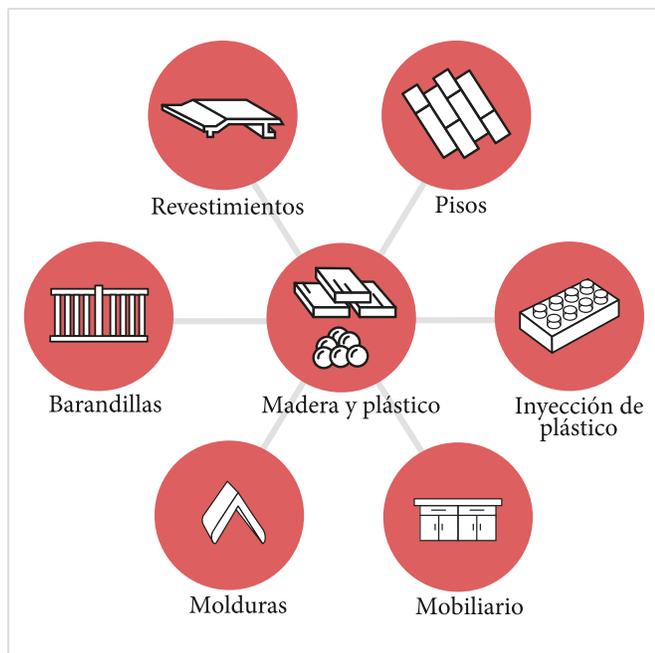


Figura 7. Productos más comercializados a partir de compuestos de madera y plástico.

El mercado de los materiales compuestos madera-plástico se considera en crecimiento. Hasta 2019 representaba un mercado de 2.12 billones de dólares en el mercado estadounidense [84]. Algunas compañías que comercializan productos a base de WPC se resumen en la Tabla 3.

TABLA 3
COMPAÑÍAS PROVEEDORAS DE PRODUCTOS CON WPC

COMPAÑÍA	TIPO DE PRODUCTOS	FUENTE:
Dow	Polímeros con silicón, polietileno de alta densidad.	[85]
Woodplastic	Madera para decoración.	[86]
Jeluplast	Jeluplast® para inyección de plásticos.	[87]
Oakio	WPC para decoración, bardas, muebles, pisos, pérgolas, pedestales, bodegas exteriores, paneles, marcos para albercas, etc.	[88]
Azo	WPC para patios, balcones, guías de jardines, etc.	[89]
Hosung	WPC para decoración, molduras y pisos.	[90]
Floresta	WPC para cocinas modulares, muebles, muebles para baño, marcos puertas y ventanas, techos interiores, muebles de oficina.	[91]
Seventrust	Nano WPC que se utilizan para elaborar paneles de madera para diferentes aplicaciones.	[92]

Una de las ventajas de los WPC es que teóricamente son vistos como compósitos verdes que utilizan solamente recursos renovables, por lo que se consideran compostables. Han sido elaborados a partir de madera decaída, ofreciendo un método para recuperar recursos de biomasa y mejorar el medio ambiente ecológico [4]. Esto permite que sean vistos como prometedores en el área de la construcción, especialmente cuando los arquitectos buscan un certificado de construcción verde [93].

Los WPC también se utilizan en una gran variedad de aplicaciones en la industria automotriz, marina, electrónica y aeroespacial, principalmente como remplazo de la fibra de vidrio y el acero [94], [95]. Es importante señalar que este tipo de materiales son manufacturados principalmente utilizando las técnicas de extrusión, moldeo por inyección de plástico y moldeo por compresión [83], por lo que la diversidad de productos que pueden ser fabricados es muy amplia.

VIII. DISCUSIÓN

A pesar de que el plástico ha sido considerado una de las cinco prioridades de la economía circular, los WPC siguen enfrentando retos importantes. Uno de ellos se vincula con el hecho de que generalmente se utilizan en aplicaciones de exteriores, lo que exige propiedades me-

cánicas a largo plazo apropiadas, mejoras en su estabilidad térmica y fotodegradación [80]. No obstante, se ha comprobado por medio de las investigaciones incluidas y comparadas en este artículo que algunas nanopartícu-

las son capaces de mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos de madera y plástico virgen (Tabla 4) y reciclado (Tabla 5) y las propiedades de absorción de agua de los WPC con plástico virgen (Tabla 6).

TABLA 4
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS MADERA-PLÁSTICO VIRGEN

	NANOPARTÍCULA	COMPUESTO MADERA-PLÁSTICO	% DE PESO	PROPIEDADES DE TRACCIÓN		PROPIEDADES DE FLEXIÓN		FUERZA DE IMPACTO	ALARGAMIENTO (%)	REF.
				FUERZA (MPa)	MÓDULO (GPa)	FUERZA (MPa)	MÓDULO (GPa)			
Óxidos metálicos	TiO ₂	Mezcla de madera dura + PP + NaOH	3	46	5.5297	58.27	4.589	0.47 (J/m)	-	[39]
		Pino + PP	50	27.8	1.545	64.8	5.627	-	3.9	[40]
	Fe ₃ O ₄ @	Álamo + PP		34	4.5	65	6	-	-	[47]
	SiO ₂	Haya + HDPE	4	27*	1.2*	-	-	38 (J/m)*		[41]
Fibras de palmera + estireno		2	-	-	-	-	20 (KJ/m ²)*	5.88	[42]	
Cerámicas	Nanoarcilla de sepiolita	Pino + PP	7	43.7	6.557	73.9	6.314		2.34	[53]
	Halloysita	Haya + polisulfona	-	4.97	119.43	5.7	126.23	1.74 (KJ/m ²)	-	[55]
	Bentonita		-	4.33	130.36	4.87	128.19	1.28 (KJ/m ²)	-	[55]
	Montmorillonita natural	Maple + PLA	3	40.38	7.15	65.19	5.16	-	1.15	[62]
		Cáscara de almendra + PP	3	10.53	2.12	15.17	1.13	-	-	[63]
	Montmorillonita organomodificada	Harina de madera + HDPE	4 phr**		2.75*	-	-	-	-	[64]
	Silicato en nanocapas	Bagazo + PP	3	-	3.45*	55*	-	18.2 (J/m)*	-	[66]
Carbono	Nanoplaquetas de grafeno	Álamo + PP	0.8	32*	3*	60*	55*	29 (J/m)*	1.4	[69]
	Nanotubos de carbono multipared	Álamo + PVC	2 phr	15.5*	2.5*					[72]
		Bagazo + HDPE	2	27.7	1.04	30.4	1.166	4.3 (KJ/m ²)	12.6	[73]

*Valores aproximados. **phr = *parts per hundreds resin* (en español, equivale a pcr = partes por cien de resina).

TABLA 5
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS MADERA-PLÁSTICO REICLADO

	NANOPARTÍCULA	COMPUESTO MADERA-PLÁSTICO	% DE PESO	PROPIEDADES DE TRACCIÓN		PROPIEDADES DE FLEXIÓN		REF.
				FUERZA (MPa)	MÓDULO (GPa)	FUERZA (MPa)	MÓDULO (GPa)	
Cerámicas	Nanoarcilla	Residuo de periódico + PP	2.5	40.5*	1.3*	-	-	[65]
	Nanoarcilla modificada c/ octadecilamina y aminopropiltrióxosilano	Carrizo + HDPE, LDPE, PP, PVC	3 (pre-degradación)	30.86	6.0548	25.87	4.76136	[57]
Mixtas	ZnO, SiO ₂ , Nanoarcilla modificada c/ octadecilamina y aminopropiltrióxosilano	Caña + HDPE, LDPE, PP, PVC	3 phr c/u	37.25	0.697	33.99	5.186	[77]

*Valores aproximados.

TABLA 6
EFECTOS DE LAS NANOPARTÍCULAS SOBRE LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS NANOCOMPUESTOS DE MADERA-PLÁSTICO VIRGEN

	NANOPARTÍCULA	COMPUESTO MADERA-PLÁSTICO	% DE PESO	ABSORCIÓN DE AGUA CON NANOPARTÍCULA (%)	ABSORCIÓN DE AGUA SIN NANOPARTÍCULA (%)	REF.
Óxidos metálicos	Fe ₃ O ₄ @	Álamo + PP	40	13*	5*	[47]
	SiO ₂	Fibras de palmera + estireno	2	5*	10*	[42]
		Corteza de haya + HDPE	4	1.9*	1.4*	[41]
Cerámicas	Silicato en nanocapas	Bagazo + PP	3	2.1*	2.6*	[66]
	Montmorillonita organomodificada	Harina de madera + HDPE	6 phr	1.6*	2.3*	[64]
	Nanoarcilla de sepiolita	Pino + PP	7	2.41	2.83	[53]
Montmorillonita natural	Cáscara de almendra + PP	3	0.31	-	[63]	
Carbonos	Nanoplaquetas de grafeno	Álamo + PP	2	4*	11*	[69]
	Nanotubos de carbono multipared	Álamo + PVC (Espumado)	2 phr	.85*	1.25*	[72]
		Cartón reciclado + HDPE	5 phr	11*	16*	[71]
Otros	SiO ₂ + nanoarcilla	Ceiba + estireno acrilonitrilo	0.5	40*	210*	[44]

*Valores aproximados.

Por otro lado, es importante mencionar que este tipo de compuestos han sido considerados como un elemento importante en la economía circular. Tan solo en la Unión Europea, en 2010 se produjeron 16 toneladas de desperdicio por persona por año, de las cuales 6 toneladas terminaban como basura [96]. La estrategia de bioeconomía europea enfatiza el uso de la madera como una clave para el crecimiento sustentable, debido a sus múltiples usos como precursor renovable de la industria química y en la industria de biocombustibles, sobre todo porque la competencia de mercados ha conducido a la previsión de que para 2030 no existirá suficiente madera para este propósito [16]. Debido a lo anterior, se ha priorizado el principio de cascada por parte de los estados miembros del Marco Directivo Europeo sobre Resi-

duos, enfatizando la prevención, la preparación para el reúso, el reciclado distinto a la incineración, otros tipos de recuperaciones y disposición final [97], [98].

Los WPC han sido considerados como materiales amistosos con el medio ambiente debido a que su materia prima puede ser virgen o reciclada. No obstante, la utilización de materiales de desecho en los WPC reduce significativamente los costos de manufactura, energía y el agotamiento de materiales vírgenes. Por eso han sido considerados una de las prioridades en las estrategias de las naciones interesadas en mejorar su economía circular a través de una eficiencia en el uso de recursos, que le permitan reducir la presión en el medio ambiente (Figura 8) [80].

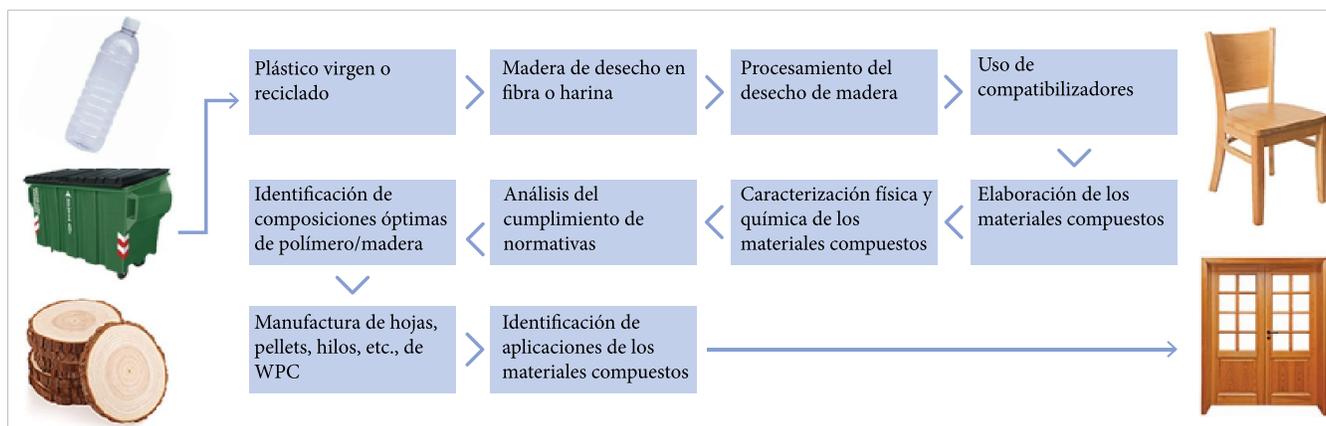


Figura 8. Proceso de fabricación de WPC y la identificación de aplicaciones en diseño de productos.

La evaluación ambiental de productos y servicios se basa en datos cuantitativos a través de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA), que está estandarizada en las normas ISO 14040 e ISO 14044 [97], [98]. El LCA es un método analítico para determinar los impactos generales de un producto, servicio o tecnología sobre el medio ambiente a través del ciclo de vida. Este análisis toma en cuenta el ciclo de vida completo, empezando en la extracción de materia prima y luego el procesamiento, disposición y cualquier posibilidad de uso o reciclaje [99]. Aunque se ha analizado la factibilidad técnica de producir este tipo de materiales, solo hay pocos estudios en donde se reporta un análisis ecológico con datos cuantitativos.

En 2016 se estimó que aproximadamente 19 millones de toneladas de productos elaborados con plástico son desechados anualmente en la Unión Europea y el 60 % finaliza en rellenos sanitarios, por lo que la recuperación de este plástico contribuiría a la economía circular y sustentabilidad [100]. El uso de recursos reciclables es indispensable para la sustentabilidad debido al aumento de basura plástica en las ciudades. En 2016, Sommerhuber [97] resumió algunos estudios previos de análisis de ciclo de vida con diferentes WPC, en el contexto de aplicación de la administración jerárquica de la basura en el posconsumo de los WPC. De esta manera, se analiza el LCA de los productos, comparando el uso de plástico virgen vs. el secundario o bien, desde la perspectiva del sistema de LCA se compara el reciclado vs. la recuperación de energía. Este autor compara la producción de plástico vs. la producción de WPC, siendo de 57 millones de toneladas por año vs. 0.26 millones de toneladas por año de WPC. Por lo tanto, concluye que el impacto potencial de los WPC hechos de plástico virgen disminuye conforme aumenta el porcentaje de madera.

Por otro lado, la madera de reúso está relacionada con los resultados de impacto potencial. No obstante, el reciclado en posconsumo de los WPC es muy sensible a la formulación de estos, por lo que es necesario determinar un protocolo para su disposición final, más relacionado con los plásticos que con la madera. En 2019, Beigbeder [98], al realizar un análisis de ciclo de vida de dos materiales compuestos de madera, uno con ácido poliláctico (PLA) y otro con PP, encontró que sus resultados están en acuerdo con la jerarquía de basura europea y la mayoría de los LCA realizados con plásticos. Los impactos que evaluaron se relacionan con cambio climático, agotamiento de energía fósil, ecotoxicidad de

agua dulce, eutrofización del agua, toxicidad humana, agotamiento de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre. De acuerdo con sus resultados, la presencia de fibras naturales de madera no afectó la tendencia reportada en plásticos. En ambos casos, los beneficios de la producción de materiales reciclados o energía compensaron los impactos por el proceso de tratamiento de basura.

Posteriormente, en 2020, una evaluación de diferentes tipos de plástico de desecho en WPC fue hecha por Basalp *et al.* [100], en función de su desempeño vs. plásticos vírgenes. Todos estos estudios indican lo difícil que resulta realizar una evaluación generalizada del impacto ambiental o el desempeño funcional de los WPC, ya que, como se puede ver, todo dependerá de la composición del mismo e incluso de los tratamientos realizados a la matriz polimérica o a las partículas o fibras de madera, sin considerar que hasta el mayor conocimiento de estos autores, los WPC, con la inclusión de nanopartículas de refuerzo, no han sido evaluados desde el punto de vista de un análisis de ciclo de vida.

Por otro lado, dependiendo de la industria en donde sea utilizado el material compuesto, se pueden generar otro tipo de impactos. Así, un WPC utilizado para el equipamiento de un automóvil implicará un peso menor y, consecuentemente, mejor consumo de combustible. En una evaluación desarrollada en 2020 por Malviya *et al.* [101], este tipo de impactos también se pueden ver en que la eutrofización producida por los WPC es menor que cuando se fabrican plásticos rellenos de polvos de vidrio que son comunes en los paneles de los automóviles.

Es importante mencionar que es difícil comparar las propiedades físicas de los WPC debido a que dependerán del tipo de matriz polimérica utilizada, así como del contenido de madera y aun de la geometría y dimensión de la misma. Por ejemplo, en 2019 Askadski *et al.* [102] identificaron que el módulo de tensión puede variar entre 5-16 MPa para un WPC con una matriz con polietileno, mientras que una con PP podría alcanzar hasta 17-40 MPa. Estas diferencias también se ven influidas por el tipo de interacción química que se genere entre las partículas o fibras y la matriz. Además, la presencia de grupos polares o no polares en la estructura de los agentes compatibilizantes puede proveer el enlace entre el polímero y la madera, lo que enfatiza la compatibilidad y la adhesión interfacial entre ambos y conduce a la mejora de las propiedades mecánicas [100].

Por otro lado, algunos de los WPC son realizados utilizando tanto madera de desecho como matrices poliméricas de material reciclado. Esto afectará, entonces, las propiedades obtenidas, por lo que se pueden generalizar. Por ejemplo, uno de los materiales más utilizados como matriz es el tereftalato de polietileno (PET). Este polímero es muy frágil, pero aun más sus propiedades dependerán del número de procesos previos a los que fue sometido debido a que las cadenas moleculares se rompen, afectando significativamente la viscosidad y las propiedades mecánicas [103]. Es conocido que aunque los termoplásticos son identificados por su capacidad de ser fundidos y solidificados, también es importante el historial térmico en los polímeros que está determinado por el número de ciclos a los que ha sido sometido el material. Esto es importante porque, conforme aumenten los ciclos, el material tenderá a perder sus propiedades debido al rompimiento de sus cadenas y a que perderá peso molecular.

Como ya fue señalado anteriormente, los WPC se utilizan generalmente en aplicaciones para exteriores, tales como terrazas, revestimientos y marcos de ventana. En 2021, Friedrich [104] estimó que en Europa, el 85 % del uso de WPC era en tabloncillos para terrazas. En este tipo de aplicaciones el material es expuesto a humedad y rayos UV, por lo que se comprometen las propiedades mecánicas y la resistencia a la humedad. La absorción de humedad se incrementa con el contenido de madera en el material compuesto debido a los grupos hidroxilos libres de la celulosa. Por este motivo, el WPC presenta amplias ventajas con fibras de madera, ya que tiende a aumentar las propiedades mecánicas, mientras que una adecuada matriz polimérica mejora la resistencia a la humedad [105]. Faure, en 2019, reportó que la absorción de agua en diferentes WPC industriales era entre el 1 % y el 1.5 % a 60 °C por 24 horas [106]. Esto contrasta con la madera, que es un material hidrofílico que se expande a medida que el agua se difunde en ella, hasta el punto de saturación y posteriormente se constriñe cuando se seca [107]. Por eso, para este tipo de aplicaciones se utilizan polímeros de características hidrofóbicas con la finalidad de potenciar las aplicaciones del material compuesto.

Al igual que la madera, los WPC son susceptibles de ser atacados por agentes xilófagos, como las termitas, por lo que su elaboración debe incluir un análisis que permita determinar la resistencia del material compuesto a estos organismos. En 2021, se reportó una

investigación en donde se analiza la resistencia de un WPC producido por compresión a las termitas, encontrando un 88.6 % de mortalidad de las mismas [108]. Por su parte, en 2019, Shiny *et al.* [109] habían reportado que nanopartículas de óxido de cobre eran eficientes para disminuir el deterioro por fungi y termitas, lo que abre nuevas posibilidades de investigación combinando el enfoque de nanocompuestos con los WPC. Es decir, en la medida en que la matriz polimérica muestre compatibilidad con microorganismos, los resultados no serán los deseados. Por eso, se busca que el polímero utilizado sea antibacterial o antifúngico, o bien que la matriz recubra perfectamente la harina o fibras de madera.

A pesar de las ventajas ambientales en el uso de WPC, en la manufactura, su uso ha estado limitado a extrusión, compresión y algunas aplicaciones en moldeo por inyección. En cambio, en la impresión 3D generalmente se usa en deposición de filamento fundido y con restricciones de temperatura debido a una posible degradación de la madera. Además, los porcentajes de madera en la composición afectarán la apariencia del producto impreso y su manufacturabilidad [23]. Por estos motivos, para mejorar las propiedades y desempeño de los WPC se ha utilizado modificación química, acrilación, eterificación y modificación del copolímero [110].

Se espera que en la medida que se realicen estudios que permitan que las propiedades reológicas del material compuesto sean útiles para la impresión, el número de matrices poliméricas utilizadas aumente y, por ende, también la impresión 3D sea una alternativa para el reciclaje de plásticos-madera.

Una de las alternativas que se ha presentado para mejorar las debilidades de los WPC es el desarrollo de nanocompuestos con partículas de diferente naturaleza. No obstante, en la búsqueda realizada durante esta investigación se identificó que la mayoría de estos desarrollos todavía no han sido escalados en productos comercializables, lo que genera un abanico de posibilidades tanto en investigación de nuevos materiales más eficientes en sus propiedades, síntesis y procesamiento, como en el diseño de estrategias que permitan que el aprovechamiento industrial de dichos productos contribuya a mejorar la economía circular relacionada con los WPC.

IX. CONCLUSIONES

Se ha demostrado, a través de numerosas investigaciones, que los compuestos de madera y plástico (WPC) son materiales que son considerados revolucionarios por sus propiedades físicas y mecánicas reforzadas y su potencial como material ecológico. No obstante, algunos investigadores no se detuvieron ahí y estudiaron los efectos de nanopartículas sobre las propiedades de estos compuestos con el fin de reforzarlos.

En términos del número de artículos reportados y analizados durante esta revisión, se comprueba que las nanopartículas más utilizadas en los compuestos de madera y plástico virgen son las nanoarcillas, seguido por las partículas de óxidos metálicos, observándose un 43.5 % de fuentes relacionadas con nanoarcillas, 33.3 % de nanopartículas metálicas y óxidos metálicos, y 23.2 % de nanopartículas de carbono. Se observó que, a diferencia de las nanoarcillas, en otras partículas, solo se optó por la utilización de plástico virgen. Además, se mostró que

1. la madera más utilizada es el álamo (*Populus deltoides*) para los compuestos de madera y plástico;
2. el termoplástico comúnmente empleado para los compuestos de madera y plástico es el PP, seguido HDPE; y
3. en la mayor parte de las investigaciones en el artículo presente se utilizó plástico no reciclado para los compuestos de madera y plástico.

En este artículo fueron revisados los distintos estudios con relación a los nanocompuestos de madera y plástico reforzados con nanopartículas de diferentes materiales de esta última década. Por lo tanto, se necesita más investigación sobre los nanocompuestos de madera y plástico a partir de plástico virgen y reciclado.

Por otro lado, dada la complejidad de asignar el impacto ambiental de este tipo de materiales, se sugieren diseñar herramientas o modelos que permitan extrapolar los resultados a los materiales compuestos desarrollados.

De la misma forma, se identificaron productos elaborados a partir de este tipo de compuestos, en los que no se reportan aplicaciones de nanocompuestos. Por lo tanto, se sugiere visualizar las alternativas que existen para el uso de nanocompuestos madera-plástico en el diseño de producto.

REFERENCIAS

- [1] X. Zhou *et al.*, “Efficient flame-retardant hybrid coatings on wood plastic composites by layer-by-layer assembly”, *J. Clean. Prod.*, vol. 321, oct. 2021, doi: [10.1016/J.JCLEPRO.2021.128949](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128949).
- [2] S. Yang, J. Jiang, W. Duan, S. Bai y Q. Wang, “Production of sustainable wood-plastic composites from the non-metals in waste printed circuit boards: Excellent physical performance achieved by solid-state shear milling”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 200, nov. 2020, doi: [10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108411](https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108411).
- [3] J. Cruz-Salgado, S. A. Romero, E. Ruelas-Santoyo, R. Z. B. López y S. Álvarez-Rodríguez, “Slack-variable model in mixture experimental design applied to wood plastic composite”, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, abr. 2021, doi: [10.1016/J.JKSUES.2021.03.017](https://doi.org/10.1016/J.JKSUES.2021.03.017).
- [4] S. Ge *et al.*, “Utilization of decayed wood for polyvinyl chloride/wood flour composites”, *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 12, pp. 862–869, may 2021, doi: [10.1016/J.JMRT.2021.03.026](https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.03.026).
- [5] S. Zhang, T. Yang, L. Li y M. Wang, “Hierarchical porous 4A zeolites as a smoke suppressant for ammonium polyphosphate-treated wood composites: Role of mesopore diameter”, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 323, p. 111191, ag. 2021, doi: [10.1016/J.MICROMESO.2021.111191](https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2021.111191).
- [6] O. Adekomaya, T. Jamiru, R. Sadiku y Z. Huan, “A review on the sustainability of natural fiber in matrix reinforcement - A practical perspective”, *J. Reinfor. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 3-7, 2016, doi: [10.1177/0731684415611974](https://doi.org/10.1177/0731684415611974).
- [7] J. F. Hernández Gámez *et al.*, “Mechanical reinforcement of thermoplastic vulcanizates using ground tyre rubber modified with sulfuric acid”, *Polym. Compos.*, vol. 39, no. 1, pp. 229-237, 2018, doi: [10.1002/pc.23922](https://doi.org/10.1002/pc.23922).
- [8] A. Santoni, P. Bonfiglio, F. Mollica, P. Fausti, F. Pompoli y V. Mazzanti, “Vibro-acoustic optimisation of Wood Plastic Composite systems”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 730-740, 2018, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.04.155](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.155).

- [9] M. Z. R. Khan, S. K. Srivastava y M. K. Gupta, “A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications”, *Polymer Testing*, vol. 89, sept. 1, 2020, doi: [10.1016/j.polymertesting.2020.106721](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721).
- [10] Focus Technology Co. “Outdoor Garden Lame Composite Decking Art Board WPC Material Price”. Made-in-China. 2021. <https://tinyurl.com/yra83u85> (accesado: 2021).
- [11] Walmart. “Piso de bambú ilios innova vertical carbonizado 24 piezas cubre 2.2 m2 #Haya”. Walmart.com. <https://tinyurl.com/ys5ymj5c> (accesado: 2021).
- [12] Y. Zhang, F. Wang, Y. Zhang, J. Li y Y. Guo, “Effect of Al powder on mechanical properties and microstructure of wood-plastic composites by selective laser sintering”, *Mater. Today Commun.*, vol. 27, jun. 2021, doi: [10.1016/J.MTCOMM.2021.102235](https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2021.102235).
- [13] J. Rao, Y. Zhou y M. Fan, “Revealing the Interface Structure and Bonding Mechanism of Coupling Agent Treated WPC”, *Polym.* vol. 10, no. 3, mar. 2018, doi: [10.3390/POLYM10030266](https://doi.org/10.3390/POLYM10030266).
- [14] M. J. Schwarzkopf y M. D. Burnard, “Wood-plastic composites—Performance and environmental impacts”, en *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*, Kutnar A., Muthu S., eds. Singapur: Springer, 2016, pp. 19-43.
- [15] M. J. Taufiq, M. R. Mansor y Z. Mustafa, “Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend”, *Compos. Struct.*, vol. 189, pp. 510-515, abr. 2018, doi: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.090](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.090).
- [16] P. F. Sommerhuber, J. L. Wenker, S. Rüter y A. Krause, “Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 117, pp. 235-248, feb. 2017, doi: [10.1016/j.resconrec.2016.10.012](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.012).
- [17] D. B. Rocha y D. dos Santos, “Coupling effect of starch coated fibers for recycled polymer/wood composites”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 172, pp. 1-8, sept. 2019, doi: [10.1016/J.COMPOSITESB.2019.05.052](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.05.052).
- [18] Z. Sun, B. Sun, Y. Bai y Z. Gao, “Economical improvement on the performances of a soybean flour-based adhesive for wood composites via montmorillonite hybridization”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 217, jul. 2021, doi: [10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108920](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108920).
- [19] J. T. Wu, K. Leung y G. M. Leung, “Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modeling study”, *Lancet*, vol. 395, no. 10225, pp. 689-697, 2020.
- [20] N. Doustmohammadi y R. Babazadeh, “Design of Closed Loop Supply Chain of Wood Plastic Composite (WPC) Industry”, *ISEIS J. Environ. Informatics*, vol. 35, no. 2, pp. 94-102, 2020, doi: [10.3808/jei.201900419](https://doi.org/10.3808/jei.201900419).
- [21] G. Barteau *et al.*, “Recycling of wood-reinforced poly-(propylene) composites: A numerical and experimental approach”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 167, sept. 2021, doi: [10.1016/J.INDCROP.2021.113518](https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113518).
- [22] Y. Zhou, P. Stanchev, E. Katsou, S. Awad y M. Fan, “A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment”, *Waste Manag.*, vol. 99, pp. 42-48, nov. 2019, doi: [10.1016/J.WASMAN.2019.08.037](https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.08.037).
- [23] Y. Huang, S. Lösckhe y G. Proust, “In the mix: The effect of wood composition on the 3D printability and mechanical performance of wood-plastic composites”, *Compos. Part C Open Access*, vol. 5, jul. 2021, doi: [10.1016/j.jcomc.2021.100140](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100140).
- [24] A. Partanen and M. Carus, “Biocomposites, find the real alternative to plastic—An examination of biocomposites in the market”, *Reinf. Plast.*, vol. 63, no. 6, pp. 317–321, 2019.
- [25] M. Fan y F. Fu, “Introduction: A perspective - natural fibre composites in construction”, en *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, M. Fan y F. Fu, eds. Elsevier, 2017, pp. 1-20.
- [26] R. Hossain, M. Tajvidi, D. Bousfield y D. J. Gardner, “Multi-layer oil-resistant food serving containers made using cellulose nanofiber coated wood flour composites”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 267, sept. 2021, doi: [10.1016/J.CARBPOL.2021.118221](https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.118221).

- [27] H. R. Taghiyari, M. Tajvidi, R. Taghiyari, G. I. Mantanis, A. Esmailpour y R. Hosseinpourpia, "Nanotechnology for wood quality improvement and protection", en *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications (Micro and Nano Technologies)*, A. Husen, M. Jawaid, eds. Elsevier, en. 2020, cap. 19, pp. 469-489, doi: [10.1016/B978-0-12-817852-2.00019-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817852-2.00019-6).
- [28] M. Gómez-Garzón, "Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde", *Rev. Repert. Med. y Cirugía*, vol. 27, no. 2, pp. 75-80, 2018, doi: [10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191](https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191).
- [29] J. Cypriyana *et al.*, "Overview on toxicity of nanoparticles, it's mechanism, models used in toxicity studies and disposal methods – A review", *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 36, sept. 2021, doi: [10.1016/J.BCAB.2021.102117](https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2021.102117).
- [30] S. M. Yadav y K. Bin Yusoh, "Subsurface mechanical properties and subsurface creep behaviour of modified nanoclay-based wood-plastic composites studied by nanoindentation", *Polym. Bull.*, vol. 76, no. 5, pp. 2179-2196, ag. 2018, doi: [10.1007/S00289-018-2497-5](https://doi.org/10.1007/S00289-018-2497-5).
- [31] H. R. Taghiyari, J. Norton y M. Tajvidi, "Effects of Nano-materials on Different Properties of Wood-Composite Materials", en *Bio-based Wood Adhesives*, Z. He y H. Wan, eds. Boca Ratón: CRC Press, jun. 2017, cap. 14, pp. 310-339, doi: [10.1201/9781315369242](https://doi.org/10.1201/9781315369242).
- [32] M. S. Goyat *et al.*, "Role of non-functionalized oxide nanoparticles on mechanical properties and toughening mechanisms of epoxy nanocomposites", *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 16, pp. 22316-22344, ag. 2021, doi: [10.1016/J.CERAMINT.2021.05.083](https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.05.083).
- [33] X. Ye, H. Wang, K. Zheng, Z. Wu, H. Zhou y K. Tian, "The interface designing and reinforced features of wood fiber/polypropylene composites: Wood fiber adopting nano-zinc-oxide-coating via ion assembly", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 124, pp. 1-9, 2016.
- [34] M. Kiaei, Y. R. Moghdam, B. Kord y A. Samariha, "The effect of Nano-MgO on the mechanical and flammability properties of hybrid nano composites from wood flour-polyethylene", *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 19, no. 4, pp. 471-480, 2017.
- [35] M. R. M. Farahani y F. Banikarim, "Effect of nano-zinc oxide on decay resistance of wood-plastic composites", *BioResources*, vol. 8, no. 4, pp. 5715-5720, 2013, doi: [10.15376/biores.8.4.5715-5720](https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5715-5720).
- [36] D. Rasouli, N. T. Dintcheva, M. Faezipour, F. P. La Mantia, M. R. Mastro Farahani y M. Tajvidi, "Effect of nano zinc oxide as UV stabilizer on the weathering performance of wood-polyethylene composite", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 133, pp. 85-91, 2016, doi: [10.1016/j.polyimdegradstab.2016.08.004](https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2016.08.004).
- [37] B. Dang, Y. Chen, X. Shen, B. Chen, Q. Sun y C. Jin, "Fabrication of a Nano-ZnO/Polyethylene/Wood-Fiber Composite with Enhanced Microwave Absorption and Photocatalytic Activity via a Facile Hot-Press Method", *Mater.* 2017, vol. 10, no. 11, p. 1267, nov. 2017, doi: [10.3390/MA10111267](https://doi.org/10.3390/MA10111267).
- [38] P. Bazant *et al.*, "Wood flour modified by hierarchical Ag/ZnO as potential filler for wood-plastic composites with enhanced surface antibacterial performance", *Ind. Crops Prod.*, vol. 62, pp. 179-187, 2014, doi: [10.1016/j.indcrop.2014.08.028](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.028).
- [39] M. Masoudifar, B. Nosrati y R. Mohebbi, "Effect of surface treatment and titanium dioxide nanoparticles on the mechanical and morphological properties of wood flour/polypropylene nanocomposites", *Int. Wood Prod. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 176-185, 2018, doi: [10.1080/20426445.2018.1552398](https://doi.org/10.1080/20426445.2018.1552398).
- [40] A. Kaymakci, "Effect of Titanium Dioxide on Some Mechanical, Thermal y Surface Properties of Wood-Plastic Nanocomposites", *BioResources*, vol. 14, no. 1, pp. 1969-1979, 2019, <https://tinyurl.com/pa9s46ce>.
- [41] M. Farsi, "Effect of Nano-SiO₂ and Bark Flour Content on the Physical and Mechanical Properties of Wood-Plastic Composites", *J. Polym. Environ.*, vol. 25, no. 2, pp. 308-314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0813-4](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0813-4).
- [42] S. M. El-Bashir, "Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers", *Polym. Bull.*, vol. 70, pp. 2035-2045, 2013, doi: [10.1007/s00289-013-0962-8](https://doi.org/10.1007/s00289-013-0962-8).
- [43] C. Liu *et al.*, "Light stabilizers added to the shell of co-extruded wood/high-density polyethylene compos-

- ites to improve mechanical and anti-UV ageing properties”, *R. Soc. Open Sci.*, vol. 5, no. 5, may. 2018, doi: 10.1098/RSOS.180074.
- [44] R. R. Devi y T. K. Maji, “Effect of nano-SiO₂ on properties of wood/polymer/clay nanocomposites”, *Wood Sci. Technol.*, vol. 46, no. 6, pp. 1151-1168, 2012, doi: 10.1007/s00226-012-0471-1.
- [45] X. Ye, H. Wang, Z. Wu, H. Zhou y X. Tian, “Synthesis and functional features of wood fiber-polypropylene materials: Based on wood fibers with assembling nano-coating via adopting simple *in situ*-hydrothermal mechanism”, *Polym. Compos.*, vol. 39, no. 1, pp. 5-13, en. 2018, doi: 10.1002/PC.23894.
- [46] H. Zhou *et al.*, “The reinforcement efficacy of nano-and microscale silica for extruded wood flour/HDPE composites: the effects of dispersion patterns and interfacial modification”, *J. Mater. Sci.*, vol. 53, pp. 1899-1910, 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1650-0.
- [47] M. Mashkour y Y. Ranjbar, “Superparamagnetic Fe₃O₄@ wood flour/polypropylene nanocomposites: Physical and mechanical properties”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 111, pp. 47-54, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.09.068.
- [48] A. Samariha y B. Bazayar, “Effect of nanosilica and aluminum hydroxide on thermal, flammability, and morphology properties of nanocomposite made of recycled high-density polyethylene and OCC flour”, *BioResources*, vol. 15, no. 2, pp. 3382-3393, 2020, doi: 10.15376/biores.15.2.3382-3393.
- [49] H. Reisi Nafchi, M. Abdouss, S. Kazemi Najafi, R. Mohabbi Gargari y M. Mazhar, “Effects of nano-clay particles and oxidized polypropylene polymers on improvement of the practical properties of wood-polypropylene composite”, *Adv. Compos. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 239-248, 2015, doi: 10.1080/09243046.2014.891341.
- [50] E. Bari, H. R. Taghiyari, O. Schmidt, A. Ghorbani y H. Aghababaei, “Effects of nano-clay on biological resistance of woodplastic composite against five wood-deteriorating fungi”, *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 17, no. 1, pp. 205-212, 2015, doi: 10.4067/S0718-221X2015005000020.
- [51] H. R. Nafchi, M. Abdouss, S. K. Najafi, R. M. Gargari y M. Mazhar, “Effects of nano-clay particles and oxidized polypropylene polymers on improvement of the thermal properties of wood plastic composite”, *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 17, no. 1, pp. 45-54, 2015, doi: 10.4067/S0718-221X2015005000005.
- [52] A. Eshraghi, H. Khademieslam y I. Ghasemi, “Effect of weathering on physical and mechanical properties of hybrid nanocomposite based on polyethylene, woodflour and nanoclay”, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, no. 4, pp. 617-626, 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000054.
- [53] A. Kaymakci, “Effect of sepiolite clay nanofibers on physical, mechanical, and thermal properties of wood-plastic nanocomposites”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2020, doi: 10.1177/0892705720939171.
- [54] M. E. Golmakani, T. Wiczenbach, M. Malikan, S. M. Mahoori y V. A. Eremeyev, “Experimental and Numerical Investigation of Tensile and Flexural Behavior of Nanoclay Wood-Plastic Composite”, *Mater.*, vol. 14, no. 11, 2021, may. 2021, doi: 10.3390/MA14112773.
- [55] A. M. Alosaimi, M. A. Hussein, M. Y. Abdelaal, T. R. Sobahi y H. D. Rozman, “Polysulfone/wood flour/organoclay hybrid nanocomposites as efficient eco-friendly materials”, *Compos. Interfaces*, vol. 27, no. 8, pp. 717-736, 2020, doi: 10.1080/09276440.2019.1692615.
- [56] Y. R. Seo, B. J. Kim y S. Y. Lee, “Effects of Nanoclay and Glass Fiber on the Microstructural, Mechanical, Thermal, and Water Absorption Properties of Recycled WPCs”, *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 472-485, 2019, doi: 10.5658/WOOD.2019.47.4.472.
- [57] B. K. Deka, T. K. Maji y M. Mandal, “Study on properties of nanocomposites based on HDPE, LDPE, PP, PVC, wood and clay”, *Polym. Bull.*, vol. 67, no. 9, pp. 1875-1892, 2011, doi: 10.1007/s00289-011-0529-5.
- [58] M. Nemati, H. K. Eslam, M. Talaeipour, B. Bazayar y A. Samariha, “Effect of nanoclay on flammability behavior and morphology of nanocomposites from wood flour and polystyrene materials”, *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 748-758, 2016, doi: 10.15376/biores.11.1.748-758.
- [59] R. Zhang, X. Jin, X. Wen, Q. Chen y D. Quin, “Alumina nanoparticle modified phenol-formaldehyde resin as a wood adhesive”, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 81, pp. 79-82, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.11.013.

- [60] H. Alabduljabbar *et al.*, “Effect of Alumina Nano-Particles on Physical and Mechanical Properties of Medium Density Fiberboard”, *Mater.*, vol. 13, no. 18, sept. 2020, doi: 10.3390/MA13184207.
- [61] B. Kord y M. Tajik, “Effect of organomodified montmorillonite on acoustic properties of wood-plastic nanocomposites”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 6, pp. 731-740, 2014, doi: 10.1177/0892705712454864.
- [62] Q. K. Meng, M. Hetzer y D. De Kee, “PLA/clay/wood nanocomposites: Nanoclay effects on mechanical and thermal properties”, *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 10, pp. 1145-1158, 2011, doi: 10.1177/0021998310381541.
- [63] M. Zahedi, H. Khanjanzadeh, H. Pirayesh y M. A. Saadatnia, “Utilization of natural montmorillonite modified with dimethyl, dehydrogenated tallow quaternary ammonium salt as reinforcement in almond shell flour-polypropylene bio-nanocomposites”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 71, pp. 143-151, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.11.009.
- [64] B. Kord, A. Varshoei y V. Chamany, “Influence of chemical foaming agent on the physical, mechanical, and morphological properties of HDPE/wood flour/nanoclay composites”, *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 30, no. 13, pp. 1115-1124, 2011, doi: 10.1177/0731684411417200.
- [65] M. A. Danesh, H. ZiaeiTabari, R. Hosseinpourpia, N. Nazarnezhad y M. Shamse, “Investigation of the morphological and thermal properties of waste newsprint/recycled polypropylene/ nanoclay composite”, *BioResources*, vol. 7, no. 1, pp. 936-945, 2012, <https://tinyurl.com/2p84h3ep>.
- [66] B. Kord, “Effects of compatibilizer and nanolayered silicate on physical and mechanical properties of PP/bagasse composites”, *Turkish J. Agric. For.*, vol. 36, no. 4, pp. 510-517, 2012, doi: 10.3906/tar-1105-4.
- [67] S. V. Pol'shchikov *et al.*, “Composite materials based on graphene nanoplatelets and polypropylene derived via in situ polymerization”, *Nanotechnologies Russ.*, vol. 8, no. 1-2, pp. 69-80, 2013, doi: 10.1134/S1995078013010114.
- [68] S. Ge *et al.*, “Potential use of different kinds of carbon in production of decayed wood plastic composite”, *Arab. J. Chem.*, vol. 11, no. 6, pp. 838-843, sept. 2018, doi: 10.1016/J.ARABJC.2017.12.026.
- [69] S. Sheshmani, A. Ashori y M. Arab, “Wood plastic composite using graphene nanoplatelets”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 58, pp. 1-6, 2013, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2013.03.047.
- [70] P. Baishya, T. Maji y T. K. Maji, “Functionalization of MWCNT and their application in properties development of green wood nanocomposite”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 149, pp. 332-339, 2016, doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.117.
- [71] B. Kord y M. Roohani, “Water transport kinetics and thickness swelling behavior of natural fiber-reinforced HDPE/CNT nanocomposites”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 126, pp. 94-99, oct. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.06.008.
- [72] A. T. Farsheh, M. Talaeipour, A. H. Hemmasi, H. Khademislam y I. Ghasemi, “Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotube”, *BioResources*, vol. 6, no. 1, pp. 841-852, 2011, doi: 10.15376/biores.6.1.841-852.
- [73] A. Ashori, S. Sheshmani y F. Farhani, “Preparation and characterization of bagasse/HDPE composites using multi-walled carbon nanotubes”, *Carbohydr. Polym.*, vol. 92, no. 1, pp. 865-871, 2013, doi: 10.1016/j.carbpol.2012.10.010.
- [74] N. Ayrimis y A. Kaymakci, “Physical, mechanical, and thermal properties of wood plastic nanocomposites reinforced with multi walled carbon nanotubes”, *presentado en InWood2015: Innovations in wood materials and processes*, Brno, República Checa, 2015.
- [75] Y. Zhang, Y. Cui, S. Wang, X. Zhao, F. Wang y G. Wu, “Effect of microwave treatment on bending properties of carbon nanotube/wood plastic composites by selective laser sintering”, *Mater. Lett.*, vol. 267, may. 2020, doi: 10.1016/J.MATLET.2020.127547.
- [76] Y. Liu *et al.*, “Fluorescent thermochromic wood-based composite phase change materials based on aggregation-induced emission carbon dots for visual solar-thermal energy conversion and storage”, *Chem. Eng. J.*, vol. 424, nov. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.130426.
- [77] B. K. Deka, P. Baishya y T. K. Maji, “Synergistic effect of SiO₂, ZnO and nanoclay on mechanical and ther-

- mal properties of wood polymer nanocomposite”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 4, 2014, doi: 10.1177/0892705712452739.
- [78] P. Bisht, K. K. Pandey y H. C. Barshilia, “Photostable transparent wood composite functionalized with an UV-absorber”, *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 189, jul. 2021, doi: 10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2021.109600.
- [79] A. M. Youssef, M. S. Hasanin, M. E. Abd El-Aziz y O. M. Darwesh, “Green, economic, and partially biodegradable wood plastic composites via enzymatic surface modification of lignocellulosic fibers”, *Heliyon*, vol. 5, no. 3, mar. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01332.
- [80] I. Turku, T. Kärki y A. Puurtinen, “Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic”, *Heliyon*, vol. 4, no. 3, mar. 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00559.
- [81] M. A. Binhussain y M. M. El-Tonsy, “Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1431-1435, oct. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.031.
- [82] L. Zhang, Z. Chen, H. Dong, S. Fu, L. Ma y X. Yang, “Wood plastic composites based wood wall’s structure and thermal insulation performance”, *J. Bioresour. Bio-prod.*, vol. 6, no. 1, pp. 65-74, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jobab.2021.01.005.
- [83] N. Dwivedi, A. P. Khare y S. Haq, “Wood Plastic Composite: Emerging Material for an Environmental Safety—A Review”, en *Advances in Clean Energy Technologies*, P. V. Baredar, S. Tangellapalli y C. S. Solanki, eds. Springer, 2021, pp. 85-99, doi: 10.1007/978-981-16-0235-1_7.
- [84] Fortune Business Insights, “Wood plastic Composite Market size, share & Industry Analysis, By Material (Polyethylene, polypropylene, Polyvinyl Chloride and others), By Application (Decking, Automotive, Sliding & fencing, Technical Application, Furniture, Consumer Goods and others)”, reporte FBI102821, 2020. Accesado: 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.fortunebusinessinsights.com/wood-plastic-composite-market-102821>.
- [85] Dow®, “Wood plastic composites materials and additives”, Dow.com, 2021. <https://tinyurl.com/326vucj6> (accesado: 2021).
- [86] Woodplastic, “Woodplasticproducts”, 2021, Woodplastic.com. <https://www.woodplastic.eu/> (accesado: 2021).
- [87] JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG, “Jeluplast Wood Plastic Composites”, [jeluplast.com](https://www.jeluplast.com/en/). <https://www.jeluplast.com/en/> (accesado: 2021).
- [88] Oakio Plastic Wood Building Materials Co., “Oakio products”, [okaio.com](https://tinyurl.com/3yur6pbt). <https://tinyurl.com/3yur6pbt> (accesado: 2021).
- [89] AZO GmbH + Co. KG, “Azo products”, [azo.com](https://www.azo.com/). <https://www.azo.com/> (accesado: 2021).
- [90] Wuhu Haoxuan Wood Plastic Composite Co., “Hosung Products”, [hosungwpc.com](https://www.hosungwpc.com/). <https://www.hosungwpc.com/> (accesado: 2021).
- [91] Wuhu Haoxuan Wood Plastic Composite Co., “Floresta products”, [hosungwpc.com](https://floresta.in/). <https://floresta.in/> (accesado: 2021).
- [92] Seven Trust, “Nano Wood Plastic Composite”, [sp6zwr.com](https://sp6zwr.com.pl/lm2/3928-Nano-Wood-Plastic-Composite.html). <https://sp6zwr.com.pl/lm2/3928-Nano-Wood-Plastic-Composite.html> (accesado: 2021).
- [93] D. Friedrich and A. Luible, “Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 1142-1152, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.123.
- [94] I. Bochkov, M. Varkale, R. M. Meri, J. Zicans, P. Franciszczak y A. K. Bledzki, “Selected aspects of wear and surface properties of polypropylene based wood-polymer composites”, *Green Tribol.*, vol. 1, no. 1, pp. 4-8, mar. 2018, doi: 10.15544/GREENTRIBO.2018.02.
- [95] F. Jamili, M. Mirjalili y H. A. Zamani, “Antibacterial wood-plastic composite produced from treated and natural dyed wood fibers”, *Polym. Polym. Compos.*, vol. 27, no. 6, pp. 347-355, may. 2019, doi: 10.1177/0967391119847537.
- [96] A. Keskiääri y T. Kärki, “The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 134, pp. 257-261, jul. 2018, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2018.03.023.

- [97] P. F. Sommerhuber, T. Wang y A. Krause, “Wood–plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard”, *J. Clean. Prod.*, vol. 121, pp. 176-185, may. 2016, doi: [10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.036](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.036).
- [98] J. Beigbeder, L. Soccalingame, D. Perrin, J. C. Bénézet y A. Bergeret, “How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) focused on polypropylene (PP)/wood flour and polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites”, *Waste Manag.*, vol. 83, pp. 184-193, en. 2019, doi: [10.1016/J.WASMAN.2018.11.012](https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.11.012).
- [99] V. Kočí, “Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets”, *Sci. Total Environ.*, vol. 686, pp. 514-528, oct. 2019, doi: [10.1016/J.SCITOTENV.2019.05.472](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.05.472).
- [100] D. Basalp, F. Tihminlioglu, S. C. Sofuoglu, F. Inal y A. Sofuoglu, “Utilization of Municipal Plastic and Wood Waste in Industrial Manufacturing of Wood Plastic Composites”, *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, no. 10, pp. 5419-5430, mar. 2020, doi: [10.1007/S12649-020-00986-7](https://doi.org/10.1007/S12649-020-00986-7).
- [101] R. K. Malviya, R. Purohit y R. K. Singh, “Life–Cycle Assessment (LCA) of Plastic–Wood Composites”, en *Wood Polymer Composites*, S. Mavinkere, J. Parameswaranpillai, M. Hemanth y S. Siengchin, eds. Singapur: Springer, 2021, pp. 233-253, doi: [10.1007/978-981-16-1606-8_12](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8_12).
- [102] A. Askadskii y T. Matsevich, *Structure and Properties of Wood-Polymer Composites (WPC)*, 1.ª ed. Cambridge Scholars Publishing, 2019.
- [103] Y.-C. Chiou, M.-Y. Shen, C.-L. Chiang, Y.-L. Li y W.-M. Lai, “Effects of Environmental Aging on the Durability of Wood-Flour Filled Recycled PET/PA6 Wood Plastic Composites”, *J. Polym. Environ.* 2021, pp. 1-14, ag. 2021, doi: [10.1007/S10924-021-02268-2](https://doi.org/10.1007/S10924-021-02268-2).
- [104] D. Friedrich, “Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique”, *Compos. Struct.*, vol. 262, abr. 2021, doi: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113649](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113649).
- [105] M. Hyvärinen, M. Ronkanen y T. Kärki, “The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite”, *Compos. Struct.*, vol. 210, pp. 321-326, feb. 2019, doi: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.11.063](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.11.063).
- [106] F. Faure, A. Perrot, S. Pimbert y T. Lecompte, “Water absorption measurements on WPCs: Assessment of size and direction dependencies in order to design fast and accurate quality control tests”, *Polym. Test.*, vol. 77, ag. 2019, doi: [10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.105899](https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.105899).
- [107] H. Mrad, S. Alix, S. Migneault, A. Koubaa y P. Perré, “Numerical and experimental assessment of water absorption of wood-polymer composites”, *Measurement*, vol. 115, pp. 197-203, feb. 2018, doi: [10.1016/J.MEASUREMENT.2017.10.011](https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2017.10.011).
- [108] Y. M. Lopez, F. G. Gonçalves, J. B. Paes, D. Gustave, A. C. Theodoro Nantet y T. J. Sales, “Resistance of wood plastic composite produced by compression to termites *Nasutitermes corniger* (Motsch.) and *Cryptotermes brevis* (Walker)”, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 152, ag. 2020, doi: [10.1016/J.IBIOD.2020.104998](https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2020.104998).
- [109] K. S. Shiny *et al.*, “A new approach to wood protection: Preliminary study of biologically synthesized copper oxide nanoparticle formulation as an environmental friendly wood protectant against decay fungi and termites”, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 21, no. 3, pp. 347-356, 2019, doi: [10.4067/S0718-221X2019005000307](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000307).
- [110] S. Fan, X. Gao, D. Zhu, S. Guo y Z. li, “Enhancement mechanism of the organic nano-montmorillonite and its effect on the properties of wood fiber/HDPE composite”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 169, oct. 2021, doi: [10.1016/J.INDCROP.2021.113634](https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113634).