

Evaluation of Flexural Strength (MOR) and Stiffness (MOE) in Wood–Plastic Composites (WPC) Made from Recycled HDPE and Pine Sawdust

Ronald Alfredo Huarcaya Paniagua¹; Andrea Carolina Yarleque Flores²; Wiliam Salvador Segura Rodriguez³

¹ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211d692@upc.edu.pe

² Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211d556@upc.edu.pe

³ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCIIWSEG@upc.edu.pe

Abstract– This study evaluated the mechanical behavior of wood–plastic composites (WPC) manufactured from recycled high-density polyethylene (HDPE) and pine sawdust without the incorporation of compatibilizing agents. The influence of extrusion temperature and sawdust content on the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE), as indicators of flexural strength and stiffness, was analyzed. A full 2^2 factorial design was applied using two temperature levels (185 °C and 195 °C) and two sawdust contents (10% and 20%), with five replicates per treatment. A total of 20 specimens were tested under three-point bending according to ASTM D790, and the results were analyzed using ANOVA. Both factors showed statistically significant effects ($p < 0.01$), with sawdust content identified as the most influential variable. The formulation processed at 185 °C with 10% sawdust showed the highest performance within the evaluated range, reaching 28.46 ± 0.64 MPa for MOR and 1849.12 ± 71.74 MPa for MOE. Increasing lignocellulosic content and processing temperature reduced the strength and stiffness of the material, associated with limited interfacial adhesion and thermal degradation of the reinforcement. The results demonstrate that recycled WPCs without additional chemical modification constitute a technically viable alternative for semi-structural applications, such as urban furniture, and for the valorization of plastic and lignocellulosic waste.

Keywords-- Wood–Plastic Composites, Factorial Design, ANOVA, Modulus of Rupture (MOR), Modulus of Elasticity (MOE).

Evaluación de la resistencia (MOR) y el módulo de elasticidad a la flexión (MOE) en compuestos madera-plástico (WPC) de HDPE reciclado y aserrín de pino

Ronald Alfredo Huarcaya Paniagua¹; Andrea Carolina Yarleque Flores²; Wiliam Salvador Segura Rodriguez³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211d692@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211d556@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCIIWSEG@upc.edu.pe

Resumen— Este estudio evaluó el comportamiento mecánico de compuestos madera-plástico (WPC) elaborados a partir de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado y aserrín de pino, sin incorporación de agentes compatibilizantes. Se analizó la influencia de la temperatura de extrusión y del contenido de aserrín sobre el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), como indicadores de la resistencia y rigidez a la flexión. Se aplicó un diseño factorial completo 2^2 con dos niveles de temperatura (185 °C y 195 °C) y dos contenidos de aserrín (10 % y 20 %), con cinco réplicas por tratamiento. Se ensayaron 20 probetas mediante flexión a tres puntos conforme a ASTM D790 y los resultados fueron analizados mediante ANOVA. Ambos factores presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.01$), siendo el contenido de aserrín la variable de mayor influencia. La formulación procesada a 185 °C con 10 % de aserrín presentó el mayor desempeño dentro del rango evaluado, alcanzando 28.46 ± 0.64 MPa para MOR y 1849.12 ± 71.74 MPa para MOE. El incremento del contenido lignocelulósico y de la temperatura de procesamiento redujo la resistencia y rigidez del material, asociado a la limitada adhesión interfacial y a la degradación térmica del refuerzo. Los resultados evidencian que los WPC reciclados sin modificación química adicional constituyen una alternativa técnicamente viable para aplicaciones semiestructurales, como mobiliario urbano, y para la valorización de residuos plásticos y lignocelulósicos.

Palabras clave— Compuestos de Madera y Plástico, Diseño Factorial, ANOVA, Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidad (MOE)

I. INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos representa una problemática ambiental de alta relevancia asociada a la creciente generación de desechos y a sus impactos sobre los ecosistemas y la salud pública. En 2023, la generación global de residuos sólidos superó los 2.1 mil millones de toneladas, con proyecciones de incremento hasta 3.8 mil millones para 2050 [1]. En el Perú, la generación nacional de residuos municipales alcanzó 8.99 millones de toneladas, de las cuales solo el 3.55 % fue valorizado, situación que evidencia brechas en la infraestructura de gestión y limitaciones en los procesos de reciclaje y recuperación de materiales, reforzando

la necesidad de fortalecer la segregación en la fuente y promover la economía circular [2].

El incremento de residuos plásticos y la necesidad de una gestión sostenible de recursos forestales han impulsado el desarrollo de compuestos madera-plástico (WPC). Estos materiales presentan resistencia a la humedad y estabilidad dimensional, características que los posicionan como una alternativa viable para sistemas de madera plástica estructural destinados a mobiliario urbano y construcción exterior [3]. En este contexto, la valorización de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) y aserrín de pino permite la reducción de residuos y la obtención de materiales con aplicación viable en sistemas de madera plástica estructural.

El comportamiento mecánico de los WPC depende de la interacción en la interfaz polímero-fibra y de los parámetros de procesamiento. El HDPE es un polímero no polar, mientras que la celulosa del aserrín es polar e hidrofílica, condición que genera una adhesión interfacial limitada y restringe la transferencia de esfuerzos [4]. En sistemas no compatibilizados, la formulación y la temperatura de extrusión constituyen variables determinantes en el desempeño mecánico del material [5], [6].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia del porcentaje de aserrín y la temperatura de extrusión sobre el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE). Para ello, se aplicó un diseño factorial completo 2^2 con repeticiones, con el propósito de identificar la formulación con mejor desempeño mecánico en términos de resistencia a la flexión y rigidez dentro del rango experimental evaluado.

Los estudios recientes sobre WPC orientados al mejoramiento de sus propiedades mecánicas priorizan el uso de agentes compatibilizantes, principalmente polietileno injertado con anhídrido maleico (MAPE), para incrementar la adhesión interfacial entre la matriz polimérica y el refuerzo lignocelulósico. Sin embargo, aún existe limitada evidencia experimental sobre sistemas elaborados exclusivamente con HDPE reciclado y aserrín de pino sin modificación química adicional, especialmente bajo diseños factoriales que permitan cuantificar simultáneamente la influencia de la formulación y

de la temperatura de extrusión sobre el comportamiento mecánico. En este contexto, el presente estudio evalúa el comportamiento a flexión de WPC no compatibilizados mediante un diseño factorial completo 2^2 , con el fin de determinar el efecto del contenido de aserrín y de la temperatura de procesamiento sobre el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), aportando evidencia experimental cuantitativa sobre el desempeño mecánico de compuestos reciclados sin compatibilización química.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

La matriz polimérica estuvo constituida por HDPE reciclado obtenido de residuos posconsumo, previamente triturados y peletizados. El refuerzo lignocelulósico consistió en aserrín de pino (*Pinus radiata*), con una fracción granulométrica comprendida entre 0.2 y 0.8 mm. El aserrín fue acondicionado mediante secado en estufa a 105 °C durante 24 h para reducir su contenido de humedad. No se incorporaron agentes compatibilizantes durante la formulación de los compuestos.

B. Diseño Experimental

Se implementó un diseño factorial completo 2^2 con dos factores y dos niveles. Se consideraron 5 réplicas por tratamiento, resultando en un total de $N = 20$ corridas experimentales. Las corridas fueron completamente aleatorizadas para minimizar la influencia de fuentes de variabilidad no controladas.

Los factores y niveles evaluados se presentan en la Tabla 1.

TABLA I
FACTORES Y NIVELES DEL DISEÑO FACTORIAL 2^2

Factor	Símbolo	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)
Porcentaje de aserrín	A	10 %	20 %
Temperatura de extrusión	B	185 °C	195 °C

Las variables de respuesta (Y) evaluadas correspondieron al módulo de ruptura (MOR), asociado a la resistencia a la flexión, y al módulo de elasticidad (MOE), representativo de la rigidez del material, ambos expresados en MPa.

C. Procesamiento y caracterización

Las mezclas se prepararon gravimétricamente y se homogeneizaron. La extrusión se llevó a cabo en una extrusora de un tornillo ($D = 30$ mm, $L/D = 20:1$), bajo las condiciones térmicas correspondientes a los niveles del factor B.



Fig. 1. Extrusora de un tornillo.

Los ensayos de flexión se realizaron en una máquina universal de ensayos Instron modelo 3382, con capacidad máxima de carga de 100 kN y precisión de ± 1 % del valor indicado. Las pruebas se ejecutaron bajo configuración de flexión en tres puntos, conforme a ASTM D790. Las probetas se dimensionaron con 300 mm de longitud, 25 mm de ancho y 17.5 mm de espesor, manteniendo una luz entre apoyos de 280 mm y una relación $L/d = 16:1$. La velocidad de desplazamiento del travesaño fue de 7.5 mm/min, calculada a partir de la tasa de deformación estándar ($Z = 0.01 \text{ min}^{-1}$) y de las dimensiones de las probetas, de acuerdo con ASTM D790.

La densidad de los compuestos WPC se determinó conforme a ASTM D792-20, Método A. Se evaluaron cinco réplicas por tratamiento experimental; los resultados se reportaron como media $\pm$ desviación estándar.

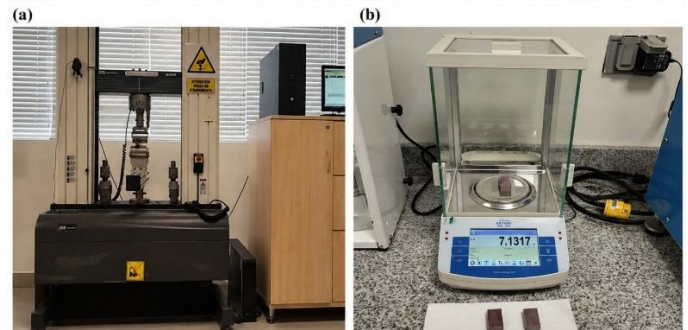


Fig. 2. Equipos empleados en la caracterización de los compuestos WPC: (a) ensayo de flexión; (b) determinación de densidad.

D. Ecuaciones de propiedades mecánicas

El MOR se determina en el punto de carga máxima ($P_{\max}$) previo a la falla:

$$MOR = \frac{3P_{\max}L}{2bd^2} \quad (1)$$

El MOE se calcula a partir de la pendiente de la región lineal de la curva carga-deflexión, correspondiente al comportamiento elástico del material:

$$MOE = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2)$$

donde m es la pendiente de la región lineal de la curva carga-deflexión, L es la luz entre apoyos, b el ancho y d el espesor de la probeta.

E. Modelo estadístico y ecuaciones del diseño factorial

El modelo lineal general para el diseño factorial 2^2 con replicaciones se expresa como:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

donde μ es la media global, τ_i y β_j representan los efectos principales de los factores A y B, respectivamente $(\tau\beta)_{ij}$ corresponde al efecto de interacción, y ε_{ijk} es el error aleatorio.

El efecto de un factor se calcula como:

$$\text{Efecto A} = \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-} \quad (4)$$

El análisis estadístico se realizó utilizando el software R (versión 4.5.1), utilizando funciones estadísticas para el ANOVA en diseños factoriales.

La suma de cuadrados (SC) de los factores y sus interacciones se estimó a partir del modelo lineal ajustado.

III. RESULTADOS

El comportamiento mecánico de los compuestos WPC fue evaluado mediante un diseño factorial completo 2^2 , considerando la influencia del contenido de aserrín y la temperatura de extrusión sobre las propiedades de flexión del material. El procesamiento estadístico de los datos experimentales se realizó mediante ANOVA, empleando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

A. Propiedades mecánicas del compuesto

Los valores medios y la dispersión estadística de MOR y MOE para cada combinación de tratamiento se detallan en la Tabla II.

TABLA II
MEDIAS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DEL MOR Y MOE DE LOS COMPUESTOS WPC

Temperatura (°C)	Aserrín (%)	MOR (MPa ± SD)	MOE (MPa ± SD)
185	10	28.46 ± 0.64	1849.12 ± 71.74
185	20	25.76 ± 0.93	1644.18 ± 106.47
195	10	27.05 ± 0.47	1672.82 ± 74.64
195	20	24.19 ± 0.82	1451.44 ± 95.65

Nota. SD = desviación estándar.

La formulación procesada a 185 °C con 10 % de aserrín presentó el mayor desempeño mecánico, alcanzando valores de MOR de 28.46 ± 0.64 MPa y MOE de 1849.12 ± 71.74 MPa. En contraste, la condición correspondiente a 195 °C y 20 % de

aserrín registró la menor respuesta mecánica, con valores de MOR de 24.19 ± 0.82 MPa y MOE de 1451.44 ± 95.65 MPa.

La Figura 3 muestra una disminución progresiva de ambas propiedades mecánicas conforme se incrementó la proporción de aserrín y la temperatura de procesamiento. En el conjunto de tratamientos evaluados, el MOR presentó valores comprendidos entre 24.19 y 28.46 MPa, mientras que el MOE varió entre 1451.44 y 1849.12 MPa.

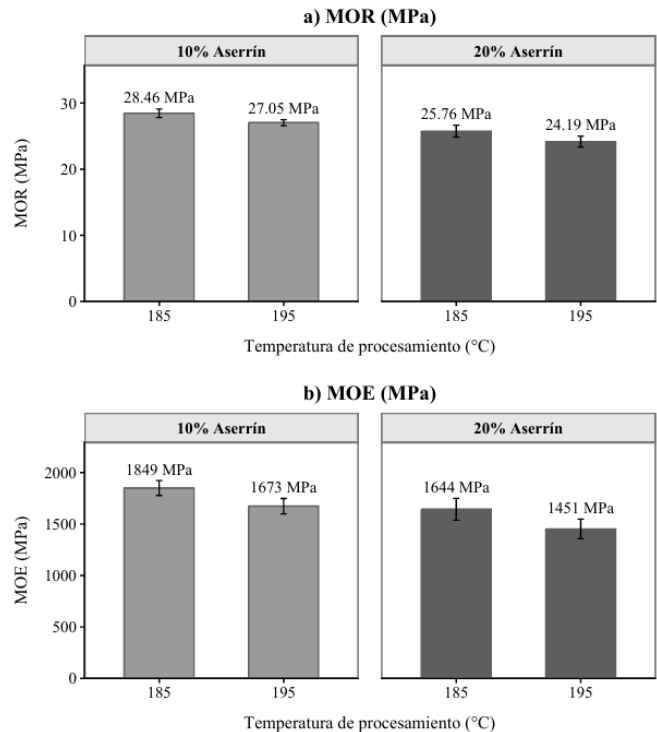


Fig. 3. Medias de MOR y MOE en función de la temperatura de procesamiento y el porcentaje de aserrín (media ± SD).

Los valores de densidad obtenidos para los compuestos WPC se presentan en la Tabla III.

TABLA III
DENSIDAD DE LOS COMPUESTOS WPC

Temperatura (°C)	Aserrín (%)	Densidad (g/cm³ ± SD)
185	10	1.002 ± 0.018
195	10	0.983 ± 0.016
185	20	0.977 ± 0.021
195	20	0.971 ± 0.019

La mayor densidad se registró en la formulación procesada a 185 °C con 10 % de aserrín (1.002 ± 0.018 g/cm³), mientras que la menor se observó en la condición de 195 °C con 20 % de aserrín (0.971 ± 0.019 g/cm³).

B. Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA permitió determinar la significancia estadística de los factores A y B, así como de su interacción, sobre los

valores de MOR y MOE. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV
RESULTADOS DEL ANOVA PARA MOR Y MOE

Fuente de variación	F (MOR)	p (MOR)	F (MOE)	p (MOE)
A (Aserrín)	71.46	2.69×10^{-7}	29.13	5.93×10^{-5}
B (Temperatura)	20.49	0.000345	21.82	0.000255
A×B (Interacción)	0.06	0.808651	0.04	0.837768

Nota. Nivel de significancia: $p < 0.05$.

El ANOVA evidenció que los factores A y B ejercieron efectos estadísticamente significativos sobre ambas respuestas mecánicas ($p < 0.05$). El factor A representó el mayor efecto estadístico sobre el comportamiento mecánico del material, con valores de F de 71.46 para MOR y 29.13 para MOE.

El factor B también mostró influencia significativa, con valores de F de 20.49 para MOR y 21.82 para MOE. En contraste, la interacción A×B no presentó significancia estadística ($p > 0.05$), lo que indica que los efectos principales no dependieron de la combinación simultánea de los factores dentro del rango experimental evaluado.

C. Efectos e interacción de los factores

La interacción de los factores se evalúa gráficamente en la Figura 4.

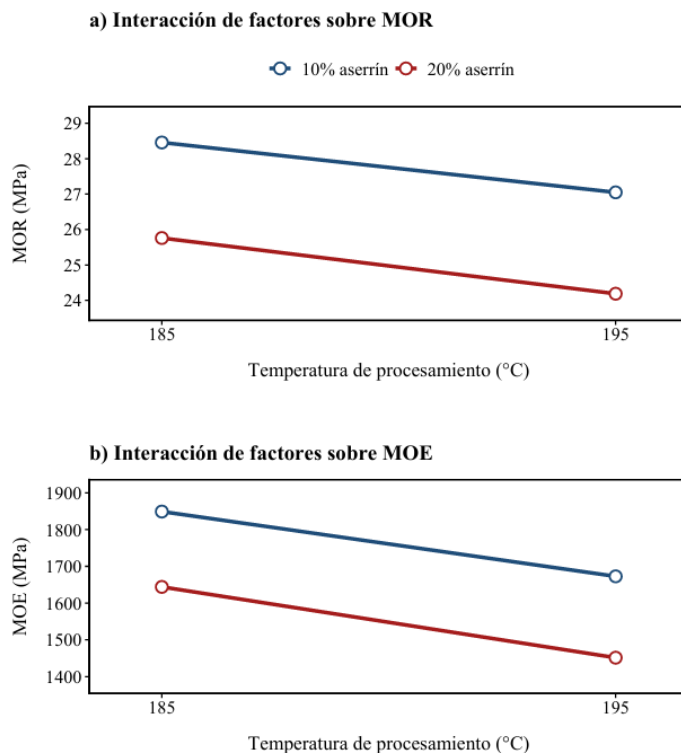


Fig. 4. Interacción de los factores sobre MOR y MOE.

La inspección gráfica es consistente con los resultados del ANOVA, evidenciando un patrón de comportamiento paralelo

entre las líneas correspondientes a los niveles de 10 % y 20 % de aserrín, resultado consistente con la ausencia de interacción significativa (A×B). El efecto de la temperatura presenta una magnitud relativamente constante entre los niveles del factor A, en concordancia con la independencia de los efectos principales.

D. Importancia relativa de los efectos

La contribución relativa de cada factor sobre las propiedades mecánicas se evaluó mediante el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, presentado en la Figura 5.

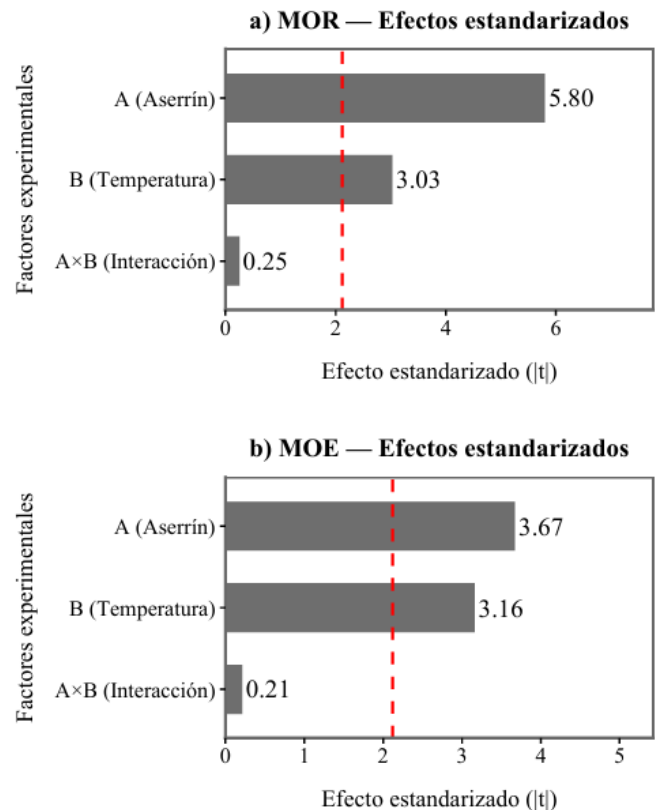


Fig. 5. Efectos estandarizados sobre MOR y MOE.

El diagrama de Pareto permitió identificar que el factor A representó la mayor contribución estadística sobre ambas respuestas mecánicas, con valores estandarizados de $|t| = 5.80$ para MOR y $|t| = 3.67$ para MOE. El factor B también presentó un efecto estadísticamente significativo, con valores de $|t| = 3.03$ para MOR y $|t| = 3.16$ para MOE.

En ambas respuestas, los efectos principales superaron el umbral crítico de significancia ($|t| \approx 2.12$), mientras que la interacción A×B permaneció por debajo de dicho límite. Este comportamiento mostró concordancia con los resultados obtenidos mediante ANOVA, evidenciando el predominio de los efectos principales sobre la respuesta mecánica del material y la menor contribución relativa del término de interacción dentro del modelo estadístico.

E. Verificación de los supuestos del modelo

Un requisito fundamental para la validez del ANOVA es el cumplimiento de los supuestos del modelo, lo cual se evaluó mediante el análisis de residuos para ambas propiedades, presentado en las Figuras 6 (MOR) y 7 (MOE).

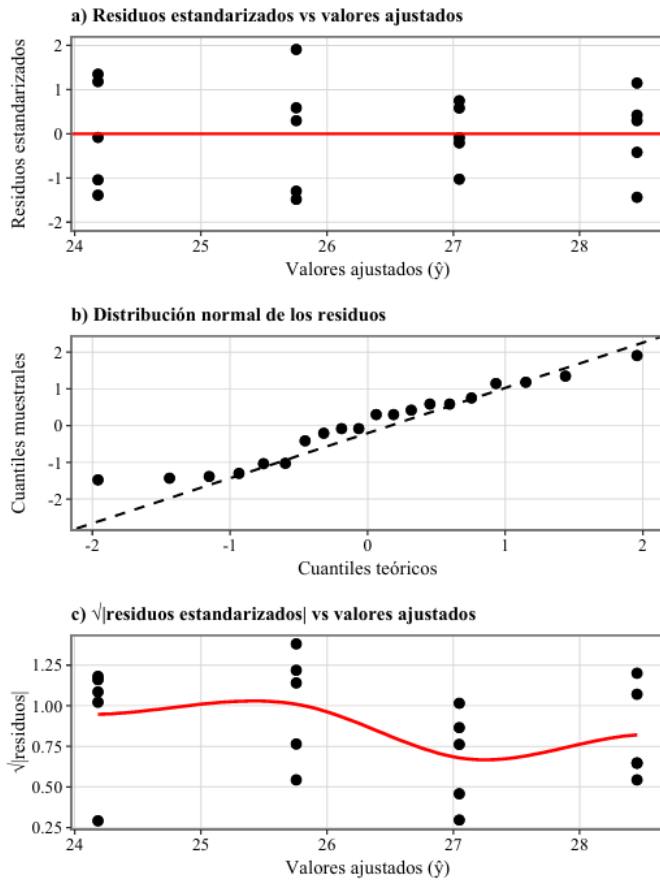


Fig. 6. Diagnóstico de supuestos del modelo ANOVA para MOR.

El análisis de residuos del MOR no evidenció desviaciones significativas respecto a los supuestos del modelo. El gráfico de residuos estandarizados frente a valores ajustados (Figura 6, panel a) muestra una dispersión sin patrón estructurado alrededor de la línea central ($\hat{y} = 0$), lo cual es consistente con independencia de los errores y varianza aproximadamente constante. La evaluación de normalidad, a partir del gráfico de cuantiles normales (panel b), indica una adecuada alineación de los residuos con la distribución teórica, en concordancia con la prueba de Shapiro-Wilk ($W = 0.946$, $p = 0.316$), que no rechaza la hipótesis nula de normalidad ($p > 0.05$). El gráfico de $\sqrt{|\text{residuos estandarizados}|}$ frente a valores ajustados (panel c) no presenta una tendencia sistemática definida, lo que es consistente con la ausencia de heterocedasticidad relevante.

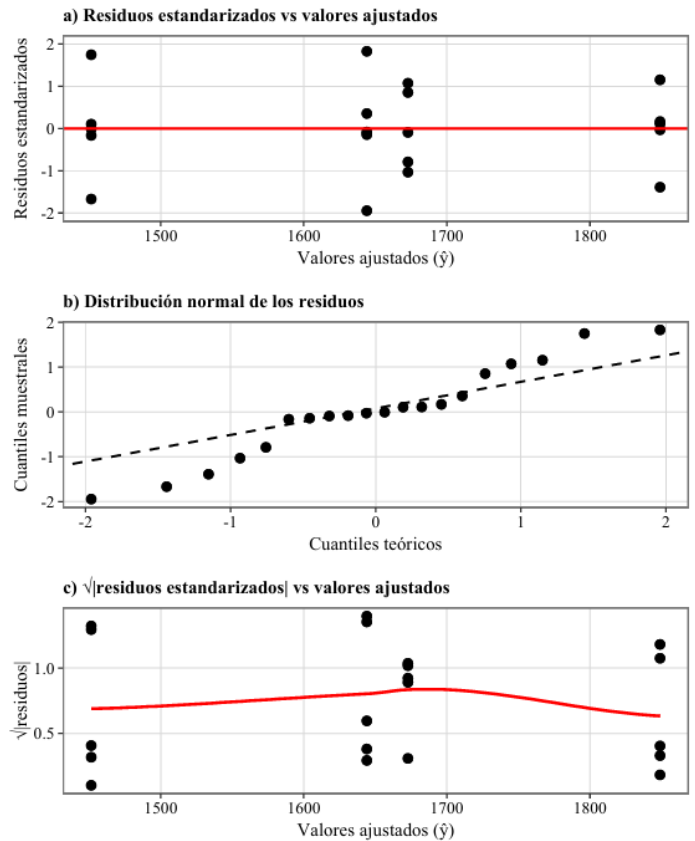


Fig. 7. Diagnóstico de supuestos del modelo ANOVA para MOE.

El comportamiento de los residuos asociado al MOE es consistente con los supuestos del modelo ANOVA. El diagrama de residuos estandarizados frente a valores ajustados (Figura 7, panel a) no presenta patrones estructurados, con dispersión centrada alrededor de la línea ($\hat{y} = 0$), indicando la independencia de los errores y homogeneidad de varianzas.

El gráfico de cuantiles normales (panel b) evidencia una adecuada alineación con la distribución teórica, con desviaciones leves en los extremos atribuibles al tamaño muestral.

El panel c ($\sqrt{|\text{residuos estandarizados}|}$ frente a valores ajustados) no presenta tendencias sistemáticas ni variaciones progresivas en la dispersión, lo cual es consistente con la ausencia de heterocedasticidad relevante.

F. Tamaños de efecto e intervalos de confianza

La Figura 8 presenta la estimación de los tamaños de efecto y sus intervalos de confianza al 95 % para las propiedades mecánicas evaluadas.

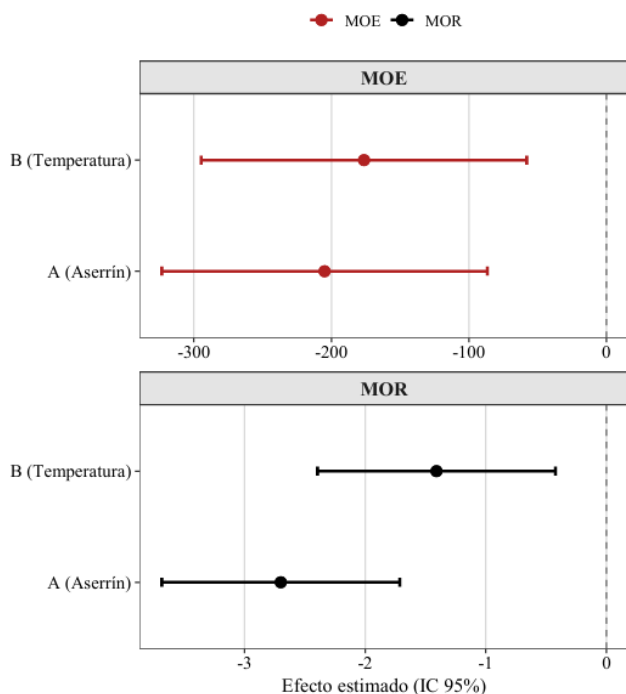


Fig. 8. Tamaños de efecto e intervalos de confianza (95 %) para MOR y MOE.

El factor A presentó el mayor efecto negativo sobre ambas respuestas. En MOR, su efecto estimado fue de -2.70 MPa (IC 95 %: -3.69 a -1.71 MPa); en MOE, el efecto estimado fue de -204.94 MPa (IC 95 %: -323.35 a -86.53 MPa). El factor B también mostró un efecto negativo y estadísticamente significativo, aunque de menor magnitud, con valores de -1.41 MPa para MOR (IC 95 %: -2.39 a -0.42 MPa) y -176.30 MPa para MOE (IC 95 %: -294.71 a -57.89 MPa). En todos estos casos, los intervalos de confianza no incluyen el valor cero, lo que respalda la significancia de los efectos principales.

En contraste, la interacción A×B presentó una contribución reducida y no significativa, en concordancia con los resultados obtenidos mediante ANOVA. La combinación correspondiente a 185 °C y 10 % de aserrín presentó los mayores valores experimentales, con 28.46 ± 0.64 MPa para MOR y 1849.12 ± 71.74 MPa para MOE.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que la respuesta a flexión de los compuestos WPC estuvo determinada principalmente por el contenido de aserrín, mientras que la temperatura de extrusión presentó una influencia secundaria dentro del intervalo evaluado. En sistemas HDPE/aserrín sin compatibilización, esta jerarquía de efectos se asocia con la continuidad de la matriz polimérica, el grado de encapsulamiento del refuerzo y la eficiencia de transferencia de esfuerzos en la interfaz fibra-matriz [5], [6].

La disminución del MOR y del MOE al incrementar el contenido de aserrín de 10 % a 20 % confirma que una mayor fracción lignocelulósica puede reducir la cohesión interna del

compuesto cuando la matriz no logra humectar ni envolver adecuadamente las partículas de refuerzo. Este comportamiento es consistente con la naturaleza no polar del HDPE y el carácter polar e hidrofílico del aserrín, condición que limita la adhesión interfacial y favorece discontinuidades internas en sistemas no compatibilizados [4], [7].

La tendencia observada coincide con Valencia et al. [8], quienes evaluaron WPC elaborados mediante moldeo por compresión a 160 ± 5 °C, empleando poliolefinas recicladas PP/HDPE en proporción 70/30 y aserrín de pino. En dicho estudio, la resistencia a flexión disminuyó de 16.38 MPa a 8.71 MPa al incrementar el contenido de aserrín de 10 wt% a 20 wt%. En la presente investigación se mantuvo la misma relación inversa entre contenido lignocelulósico y desempeño mecánico; sin embargo, se alcanzó un MOR superior de 28.46 MPa en la condición de 185 °C y 10 % de aserrín. Esta diferencia puede atribuirse al uso de HDPE reciclado como matriz principal y al proceso de extrusión, que favorece una dispersión más homogénea del refuerzo, mayor continuidad de matriz y una consolidación más uniforme del material [8].

En términos de rigidez, el MOE máximo obtenido fue de 1849.12 MPa, superior al valor de 1.65 GPa reportado en [8] para formulaciones con 10 wt% de aserrín de pino. Esto indica que la condición óptima no solo mejoró la resistencia máxima, sino también la estabilidad frente a deformación. No obstante, el desempeño continúa por debajo de sistemas con mayor control morfológico del refuerzo. Xu et al. [9] reportaron 74.16 MPa de resistencia a flexión y 5.35 GPa de módulo en compuestos HDPE/fibra de madera con distribución controlada de tamaños de fibra, lo que confirma que la granulometría y la arquitectura del refuerzo son variables críticas para incrementar la eficiencia estructural del WPC.

La comparación con sistemas compatibilizados permite ubicar con mayor precisión el alcance del material evaluado. Khamtree et al. [10] reportaron resistencias cercanas a 27 MPa en formulaciones sin MAPE y hasta 37.55 MPa al incorporar MAPE como agente de acoplamiento en compuestos con residuos lignocelulósicos y matriz del PP reciclado. En este contexto, el MOR máximo obtenido en el presente estudio, resulta comparable con formulaciones no compatibilizadas y menor frente a sistemas con acoplamiento químico. Esta relación confirma que la compatibilización mejora la transferencia de esfuerzos; sin embargo, también evidencia que una formulación simplificada basada en HDPE reciclado y 10 % de aserrín puede alcanzar un desempeño mecánico competitivo sin modificación química adicional [7], [9].

El efecto de la temperatura fue significativo, aunque menos dominante que el contenido de aserrín. La reducción de MOR y MOE al pasar de 185 °C a 195 °C sugiere que el incremento térmico no mejoró la consolidación del compuesto, sino que pudo afectar la integridad del refuerzo lignocelulósico. En WPC, temperaturas próximas a 200 °C pueden acelerar la degradación de hemicelulosas y deteriorar la superficie de las fibras, reduciendo la calidad interfacial [5], [6]. Por ello, la condición de 185 °C representó un equilibrio más favorable

entre plastificación del HDPE, preservación del aserrín y consolidación interna del material.

Mirindi et al. [11] reportaron, para sistemas HDPE reforzados con fibra de pulpa de abedul amarillo y MAPE, valores de MOR entre 33.19 y 66.70 MPa y MOE entre 1390 y 4190 MPa. Aunque el MOR máximo de este estudio fue inferior, el MOE se ubicó dentro de dicho intervalo, pese a tratarse de un sistema sin compatibilizante, con aserrín de pino y HDPE reciclado. Esta comparación evidencia que el material desarrollado no alcanza el nivel de formulaciones químicamente optimizadas, pero sí presenta una respuesta estructural relevante dentro de un esquema de procesamiento más simple.

Los valores de densidad, entre 0.971 y 1.002 g/cm³, fueron coherentes con compuestos basados en poliolefinas y refuerzos lignocelulósicos. En [11] reportaron densidades cercanas a 0.970 g/cm³ para sistemas con HDPE, mientras que Kesik et al. [12] informaron valores entre 0.970 y 1.001 g/cm³ en tableros compuestos tipo Copalit. La mayor densidad registrada en la formulación de 185 °C y 10 % de aserrín sugiere una mejor compactación, menor presencia relativa de vacíos y mayor continuidad interna, factores coherentes con el mayor MOR y MOE obtenidos en esa condición.

Desde el punto de vista aplicado, las formulaciones evaluadas alcanzaron MOR entre 24.19 y 28.46 MPa y MOE entre 1451.44 y 1849.12 MPa, valores compatibles con aplicaciones de exigencia mecánica moderada. En [12] reportaron resistencias a flexión de 35.43–45.25 MPa en tableros compuestos para mobiliario, así como valores de referencia de 24.70 MPa para MDF y 19.04 MPa para OSB. En este marco, el MOR máximo obtenido supera algunos materiales convencionales utilizados en aplicaciones no estructurales, lo que respalda su potencial para mobiliario urbano.

Los resultados también son consistentes con Endesha et al. [13], quienes reportaron que el incremento del contenido de HDPE reciclado de 20 % a 35 % mejoró la resistencia a flexión, tracción e impacto en WPC compatibilizados con MAPE. Esta evidencia refuerza que una mayor proporción de matriz polimérica favorece la continuidad estructural y la transferencia de carga, lo cual coincide con el mejor desempeño observado en la formulación con 10 % de aserrín. Por tanto, el contenido de matriz y la calidad interfacial constituyen variables importantes para optimizar WPC reciclados sin comprometer su viabilidad técnica.

En conjunto, los resultados demuestran que el control de la formulación y de la temperatura de extrusión permite obtener WPC de HDPE reciclado/aserrín con desempeño funcional sin recurrir a compatibilizantes. Esta condición reduce la complejidad del sistema, favorece la valorización de residuos plásticos y lignocelulósicos, y fortalece su alineación con estrategias de economía circular. No obstante, para validar su desempeño en condiciones reales de servicio, futuras investigaciones deberán incorporar análisis SEM, absorción de agua, impacto, envejecimiento acelerado y caracterización

térmica, a fin de precisar los mecanismos de falla y ampliar su aplicabilidad en productos de mayor exigencia.

V. CONCLUSIONES

El contenido de aserrín se identificó como el factor dominante en la respuesta mecánica de los compuestos WPC, evidenciando efectos altamente significativos ($p < 0.01$) sobre el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), mientras que la temperatura de extrusión presentó una influencia secundaria y la interacción entre factores no resultó significativa. La mejor condición de procesamiento se estableció a 185 °C con 10 % de aserrín, alcanzándose valores de MOR = 28.46 ± 0.64 MPa y MOE = 1849.12 ± 71.74 MPa, lo que confirma la influencia determinante de las variables de formulación y procesamiento en el desempeño del material.

En conjunto, los resultados demuestran que es posible optimizar las propiedades mecánicas de compuestos WPC elaborados a partir de HDPE reciclado y aserrín de pino sin el uso de compatibilizantes, manteniendo un desempeño adecuado dentro del rango evaluado. Estos hallazgos evidencian la viabilidad técnica de este tipo de materiales bajo condiciones de procesamiento simplificadas, destacando su potencial como alternativa sostenible para aplicaciones de exigencia mecánica moderada, en el contexto de estrategias de valorización de residuos y economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), a los profesores del curso de Proyectos de Investigación Ambiental por impulsar el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, "Perspectiva mundial de la gestión de residuos 2024," Feb. 2024. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>
- [2] Ministerio del Ambiente del Perú, "Información ambiental del Perú," Ministerio del Ambiente (MINAM). Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://site.minam.gob.pe/Informacion>
- [3] Z. Zhao, Z. Zhang, H. Wang, C. Li, L. Le, and M. Liu, "Functional wood-plastic composites: A review of research progress on flame retardancy, weather resistance and antimicrobial properties," *Ind. Crops Prod.*, vol. 223, p. 120196, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.120196.
- [4] P. Samyn, "Challenges for Wood-Plastic Composites: Increasing Wood Content and Internal Compatibility," *Environmental and Earth Sciences Proceedings 2024, Vol. 31, Page 1*, vol. 31, no. 1, p. 1, Dec. 2024, doi: 10.3390/EESP2024031001.
- [5] B. Jian et al., "A Review on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites," *Polymers 2022, Vol. 14, Page 3942*, vol. 14, no. 19, p. 3942, Sep. 2022, doi: 10.3390/POLYM14193942.

- [6] A. Khan, A. Mishra, V. K. Thakur, and A. Pappu, "Towards sustainable wood–plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects," *RSC Sustainability*, vol. 3, no. 7, pp. 2833–2862, Jul. 2025, doi: 10.1039/D5SU00153F.
- [7] X. Hao *et al.*, "Interfacial adhesion mechanisms of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites using maleic anhydride grafted polyethylene as a compatibilizer," *Mater. Des.*, vol. 212, p. 110182, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.MATDES.2021.110182.
- [8] J. C. Rosas Valencia *et al.*, "Mechanical Performance of Wood–Plastic Composites from Sawdust and Recycled Bottle Cap Polyolefins (PP/HDPE) for Temporary Concrete Formwork," *Journal of Composites Science* 2025, Vol. 9, Page 644, vol. 9, no. 12, p. 644, Nov. 2025, doi: 10.3390/JCS9120644.
- [9] H. Xu *et al.*, "Mechanical Properties Variation in Wood—Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size," *Materials* 2023, Vol. 16, Page 5801, vol. 16, no. 17, p. 5801, Aug. 2023, doi: 10.3390/MA16175801.
- [10] S. Khamtree, C. Srivabut, S. Khamtree, and R. Kaewmai, "Effects of Natural Fiber Waste, Content, and Coupling Agent on the Physical and Mechanical Properties of Wood Species–Plastic Composites as Green Materials," *Fibers and Polymers* 2024 25:4, vol. 25, no. 4, pp. 1391–1402, Feb. 2024, doi: 10.1007/S12221-024-00493-9.
- [11] D. Mirindi, D. Sinkhonde, and F. Mirindi, "Application of machine learning to predict the properties of wood- composite made from PET, HDPE, and PP fibres," *Manuf. Lett.*, vol. 44, pp. 24–35, Aug. 2025, doi: 10.1016/J.MFGLET.2025.06.007.
- [12] F. B. Dergisi, H. İ. Kesik, K. Çağatay, R. Bülbül, and A. Makalesi Başvuru, "Investigation of Physical and Mechanical Properties of Copalit Composite Boards," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 14, no. 1, pp. 264–276, Feb. 2026, doi: 10.29109/GUJSC.1827458.
- [13] A. Endesha, G. Tefera, G. Bright, and S. Adali, "The Influence of Wood Flour and Recycled High-Density Polyethylene on the Mechanical Performance of Wood–Plastic Composites (WPCs)," *Journal of Composites Science* 2026, Vol. 10, Page 66, vol. 10, no. 2, p. 66, Jan. 2026, doi: 10.3390/JCS10020066.