



Efecto de la incorporación de ceniza de madera o sales de boro en el tiempo de ignición y pérdida de masa de materiales lignocelulósicos

Título corto: Reacción al fuego de compuestos de madera

Sonia Correa-Jurado (<https://orcid.org/0009-0002-8401-5885>)

José G. Rutiaga-Quñones (<https://orcid.org/0000-0002-8617-8947>)

Javier R. Sotomayor-Castellanos* (<https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>)

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 58030. Morelia, Michoacán, México.

*Corresponding author: javier.sotomayor@umich.mx

Resumen

Introducción. Los materiales lignocelulósicos presentan ignición rápida y pérdida de masa que limitan su reacción al fuego. La incorporación de aditivos minerales constituye una alternativa para mejorar su estabilidad térmica.

Objetivo. Evaluar el efecto de la incorporación de 5 % de ceniza de madera o sales de boro sobre el tiempo de ignición y la pérdida de masa de materiales compuestos a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Materiales y métodos. Se fabricaron tres materiales compuestos con aserrín de *P. pseudostrobus* y adhesivo de harina de trigo: sin aditivos, con 5 % de ceniza y con 5 %



de sales de boro. Estos se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido con análisis de energía dispersiva y fluorescencia de rayos X. El tiempo de ignición y la pérdida de masa se determinaron mediante combustión directa con ignición pilotada bajo condiciones controladas.

Resultados. Con respecto al material sin aditivos, el material modificado con ceniza incrementó 3 s el tiempo de ignición y redujo 2 % la pérdida de masa, mientras que el material con sales de boro incrementó 12 s el tiempo de ignición y redujo 4 % la pérdida de masa. Las diferencias fueron estadísticamente significativas de acuerdo con la prueba de Tukey HSD ($p < 0.05$).

Conclusiones. Los aditivos mejoraron la reacción al fuego; las sales de boro fueron más eficaces por su acción química sobre la pirólisis, que favorece la formación de carbón y reduce volátiles. En contraste, la ceniza mostró efecto moderado como barrera térmica física. Estos resultados establecen criterios para el diseño de materiales lignocelulósicos.

Palabras clave: aserrín, aditivos, *Pinus pseudostrobus*, reacción al fuego, retardante de llama.

Recibido: 24 de noviembre de 2025

Aceptado: 12 de agosto de 2026

Introducción

La incorporación de ceniza en materiales lignocelulósicos, mediante mecanismos físicos y químicos, modifica la dinámica de ignición. Las fases minerales de la ceniza (CaO , MgO y SiO_2) pueden favorecer la formación de una capa inorgánica residual que actúa como barrera térmica, reduciendo la transferencia de calor y la oxidación, lo que puede incrementar el tiempo de ignición. Adicionalmente, las fracciones finas pueden favorecer



procesos de sinterización durante el calentamiento, modificando la degradación térmica. En consecuencia, la composición química y la morfología de las partículas de ceniza pueden determinar el efecto observado (Puri et al., 2024).

En términos de pérdida de masa, la ceniza incrementa el residuo sólido tras la combustión y reduce la pérdida de masa relativa, debido a la estabilidad de sus constituyentes inorgánicos. Esto favorece la formación de carbón que actúa como barrera protectora y limita la oxidación de la fracción lignocelulósica, incluyendo procesos de reorganización estructural (Béguerie et al., 2023). Algunos estudios en plásticos y biocompuestos muestran que la incorporación de ceniza mejora la estabilidad térmica y la resistencia al fuego (Akaki et al., 2012), especialmente en combinación con otros retardantes (Kairytė et al., 2020). La eficacia de la ceniza depende del tamaño de partícula del aserrín y su distribución en la matriz. Así, el diseño microestructural y el tratamiento previo de la ceniza son determinantes para optimizar su desempeño como aditivo retardante (Asante et al., 2021; Glushkov et al., 2023).

Por otra parte, las sales de boro, como el ácido bórico y el borato de sodio, actúan como retardantes de llama en materiales lignocelulósicos al modificar las rutas de pirólisis y promueven reacciones de deshidratación y la formación de carbón (Kumar et al., 2022; Liu et al., 2020). Esto genera una matriz carbonosa más estable y capas vítreas ricas en trióxido de boro (B_2O_3) que actúan como barreras físicas, inhibiendo la transferencia de calor, la difusión de gases combustibles y el acceso de oxígeno (Uner et al., 2016). Estudios termogravimétricos muestran que los boratos disminuyen la temperatura máxima de degradación y aumentan el residuo carbonoso hasta 75 %, frente a 33 % en madera sin tratar (Uner et al., 2016). Además, los boratos favorecen la formación de productos no inflamables como CO_2 y H_2O , reduciendo la generación de compuestos volátiles combustibles (Kumar et al., 2022; Liu et al., 2020).

En términos de pérdida de masa, los tratamientos con boratos reducen la tasa máxima de degradación y la fracción perdida en etapas críticas de la descomposición térmica. La eficacia de estos sistemas aumenta con una distribución homogénea del aditivo, facilitada por partículas finas, lo que mejora la estabilización térmica y la reducción de masa (Li et al., 2020). Este efecto depende de su interacción con la microestructura, donde tamaños



menores de partícula incrementan la superficie disponible y optimizan la impregnación. En conjunto, los boratos actúan en la fase sólida promoviendo la formación de carbón y, en la fase gaseosa, inhibiendo radicales, lo que explica su eficacia como retardantes de llama en compuestos lignocelulósicos (Shen et al., 2022). Este comportamiento ha sido confirmado en sistemas lignocelulósicos modificados con boratos y estructuras híbridas inorgánicas (Lin et al., 2024).

El tiempo de ignición y pérdida de masa se miden habitualmente con calorímetro de cono siguiendo la norma ISO 5660-1:2015 (International Organization for Standardization, 2015), que expone la probeta a una irradiancia controlada y registra el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la tasa de liberación de calor. Para estudiar cómo el tamaño de las partículas afecta el resultado, se utilizan experimentos que cambian el tamaño del aserrín con termogravimetría (Aniza et al., 2024), calorimetría de cono, análisis de residuos con microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X (Altuntaş et al., 2017; Li et al., 2020). Este enfoque multiparamétrico permite relacionar el tiempo de ignición y la pérdida de masa con procesos como el bloqueo físico, la sinterización y la catálisis de carbonización. Estudios en madera y biocompuestos destacan la necesidad de emplear termogravimetría y calorimetría de cono para evaluar el efecto del tamaño de partícula (Fang et al., 2013; Rantuch et al., 2021). En este estudio se utilizó un protocolo de combustión directa adaptado. Si bien difiere del calorímetro de cono en el control de irradiancia y flujo de calor, lo que limita la comparabilidad directa con resultados normalizados, permite la comparación del tiempo de ignición y la pérdida de masa bajo condiciones reproducibles entre tratamientos.

La evaluación de materiales compuestos puede requerir adaptaciones metodológicas que, sin apegarse estrictamente a normas estandarizadas, mantengan la validez experimental. El uso de muestras no estandarizadas puede ser necesario para acomodar expansión térmica o carga alta de relleno (Schartel & Hull, 2007). En estos casos, es esencial caracterizar y reportar las desviaciones e incluir materiales de referencia para asegurar que las variaciones en el tiempo de ignición y la pérdida de masa se atribuyan al material y no a los artefactos experimentales; de esta forma, se garantiza la repetibilidad interna y validez experimental (Babrauskas, 2025; Sandinge et al., 2022).



El desarrollo de materiales lignocelulósicos con mejor desempeño en reacción al fuego requiere alternativas sostenibles que reduzcan su vulnerabilidad térmica. Aunque la ceniza de madera y las sales de boro han sido reportadas como retardantes, existe evidencia comparativa limitada bajo condiciones experimentales equivalentes. En particular, no se ha establecido con precisión el efecto de la incorporación del 5 % sobre el tiempo de ignición y la pérdida de masa, ni los mecanismos dominantes en cada caso, lo que limita la selección informada de aditivos para el diseño de compuestos más seguros y sostenibles.

En los compuestos lignocelulósicos, el aumento en la concentración de retardantes mejora la resistencia al fuego al favorecer la formación de carbón residual, aunque puede modificar las propiedades físicas y mecánicas del material (Ayrilmis, 2020; Uner et al., 2016). En este contexto, las concentraciones intermedias representan un compromiso entre eficacia ignífuga y estabilidad estructural. Además, el desempeño depende de la naturaleza química y la dosificación del retardante, por lo que es necesario optimizar su contenido para el equilibrio de las propiedades térmicas y mecánicas (Pedieu et al., 2025). Bajo este criterio, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la incorporación de 5 % de ceniza de madera o de sales de boro en el tiempo de ignición y la pérdida de masa en materiales compuestos a base de aserrín. El presente estudio utilizó una concentración fija de 5 % bajo condiciones equivalentes, aislando el efecto del tipo de aditivo. La selección de esta concentración se fundamenta en su uso como un nivel eficaz para modificar la degradación térmica sin comprometer la integridad estructural del material, considerando que concentraciones más elevadas de retardantes, particularmente compuestos de boro, pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad (Toker et al., 2009).

Materiales y métodos

Materiales

Se elaboraron tres materiales compuestos a partir de aserrín de *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Figura 1) proveniente del estado de Michoacán, México ($17^{\circ} 54' - 20^{\circ} 24' N$; $100^{\circ} 04' - 103^{\circ} 44' O$). El material presenta partículas lignocelulósicas de superficie irregular, con variación en tamaño y forma. Tales características influyen en la compactación, la distribución del adhesivo y la interacción con los aditivos y, por tanto, afectan las propiedades físicas y la densidad del material compuesto (Cabral et al., 2022), siendo relevante para interpretar la microestructura y el comportamiento frente al fuego. El aserrín se clasificó en las siguientes fracciones granulométricas: $>850 \mu m$ (50 %), $850-425 \mu m$ (25 %), $425-250 \mu m$ (12.5 %) y $<250 \mu m$ (12.5 %).



Figura 1. Morfología del aserrín de *Pinus pseudostrobus* (fracción $>850 \mu m$, observada con lupa binocular 10x) utilizado para la elaboración de materiales compuestos.

Un adhesivo de harina de trigo (30 % respecto al peso del aserrín) se combinó con agua (200 %) y se sometió a ebullición para obtener una pasta previamente gelatinizada (Ferdosian et al., 2017). El adhesivo se incorporó al aserrín hasta formar una masa homogénea que se compactó en moldes de $2 \times 17 \times 17$ cm mediante una prensa de



laboratorio a 2.5 MPa durante 5 min, para reducir vacíos y uniformar el espesor (Figura 2). Se prepararon nueve placas y se sometieron a un secado escalonado (65, 85 y 103 °C, 24 h cada etapa) hasta peso constante. Una vez secas se clasificaron como material compuesto natural (MCn).

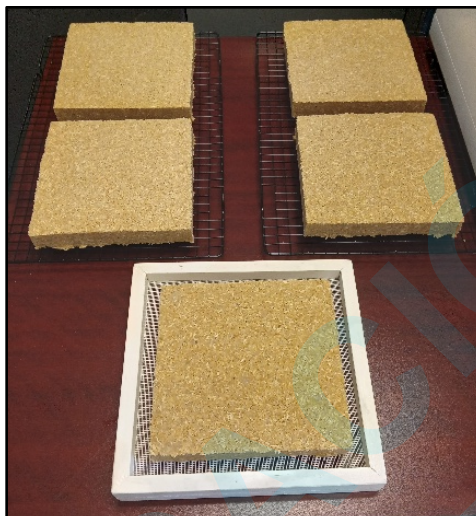


Figura 2. Placas del material compuesto natural (MCn) en condición húmeda, elaborado con aserrín de *Pinus pseudostrobus*, agua y adhesivo de harina de trigo.

Para la fabricación de los materiales compuestos con aditivos se siguió el mismo procedimiento base del material natural. La ceniza de madera y las sales de boro al 5 %, respecto al peso del aserrín, se incorporaron durante la preparación del adhesivo. Esto se hizo mediante agitación manual hasta lograr una distribución uniforme. Posteriormente, el adhesivo gelatinizado se añadió al aserrín y se continuó el mezclado hasta obtener una masa homogénea, asegurando la dispersión del aditivo en todo el volumen. Para el material con ceniza (MCc) se utilizó la proveniente de madera de *P. pseudostrobus* en la proporción indicada, mientras que el material con boro (MCb) se formuló con una mezcla de ácido bórico (39.4 %) y borato de sodio (60.6 %), manteniendo el mismo contenido total de aditivo. De cada material se obtuvieron 22 probetas (2 × 2 × 15 cm), las cuales se acondicionaron a 20 °C y 65 % de humedad relativa hasta alcanzar peso constante.



Métodos

El contenido de humedad (CH) se calculó por diferencia de masa conforme a la norma ISO 13061-1:2014 (ISO, 2014a) y la densidad (ρ) se determinó mediante la relación masa-volumen en el momento del ensayo según ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014b). La ceniza se obtuvo de acuerdo con ISO 18122:2022 (ISO, 2022) y se caracterizó por fluorescencia de rayos X para cuantificar su composición en óxidos, utilizando un espectrómetro S8 Tiger (Bruker, Alemania), técnica utilizada ampliamente en materiales lignocelulósicos (Edoziuno & Akaluzia, 2024).

Determinación del tamaño de partícula

El tamaño y la distribución de partícula se determinaron por difracción láser con un analizador LS 100Q (Coulter, Estados Unidos), conforme a la ISO 13320:2020 (ISO, 2020) y ASTM B822-20 (ASTM International, 2020). Para cada compuesto se prepararon dos muestras deshidratadas (5 g), secadas a 103 °C durante 48 h y tamizadas a $\leq 60 \mu\text{m}$. La distribución granulométrica se caracterizó mediante los diámetros percentiles D[10], D[25], D[50], D[75] y D[90], así como el porcentaje en volumen de las partículas.

Microscopía electrónica de barrido

La morfología se analizó mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (JSM-7600F, JEOL, Japón), con base en las metodologías para la caracterización microestructural de materiales lignocelulósicos (Mikac et al., 2018). Se obtuvieron microfotografías y mapas elementales. Para cada material se prepararon dos muestras (4 × 4 × 4 mm) previamente secas, montadas en portaobjetos de aluminio y recubiertas



con una capa de cobre para asegurar conductividad. La homogeneidad y porosidad se evaluaron a 500x.

Microanálisis por energía dispersiva de rayos X

El análisis elemental acoplado a la microscopía electrónica de barrido se empleó para determinar la distribución de elementos y marcadores de los aditivos en áreas representativas, mediante la detección de rayos X generados por la interacción del haz de electrones con el material. Los datos se procesaron para obtener mapas elementales y relacionar la microestructura con la distribución de fases inorgánicas, conforme las metodologías para materiales lignocelulósicos (Oladele et al., 2025). El análisis se realizó a 15 kV con recubrimiento conductor de cobre. Se aplicó espectroscopía puntual para cuantificar la composición relativa (% peso atómico) en matriz, partículas e interfaz. Posteriormente, se hizo un mapeo elemental para identificar C, N y O en la matriz orgánica; Si, K y Ca en cenizas; y B y Na en sales de boro.

Espectrometría de fluorescencia

El análisis químico se realizó mediante fluorescencia de rayos X (S8 Tiger, Bruker, Alemania) conforme a la ISO 12677:2011 (ISO, 2011). Se analizaron muestras secas de los compuestos (MC control, MC ceniza, MC boro), previamente molidas y tamizadas a $\leq 60 \mu\text{m}$; para cada material se prepararon dos muestras de 5 g. Se determinaron los porcentajes de óxidos en la ceniza y en cada mezcla.

Pruebas de reacción al fuego



La masa y las dimensiones de cada probeta se registraron previamente a las pruebas de reacción al fuego, conforme a un protocolo de combustión directa por encendido pilotado adaptado de Esmailpour et al. (2020). Las probetas se expusieron a una fuente térmica mediante un mechero tipo Meker-Fisher (quemador de 30 mm, con temperatura máxima nominal de la llama de 1 300 °C) a una distancia constante de 9 cm entre la fuente de calor y la muestra (**Figura 3**) durante 3 min. Este método no corresponde al ensayo normalizado de calorimetría de cono ni reproduce la irradiancia establecida en la norma ISO 5660-1:2015 (ISO, 2015); en consecuencia, los resultados no son directamente comparables con datos normalizados, sino que permiten una evaluación relativa entre tratamientos bajo condiciones controladas.

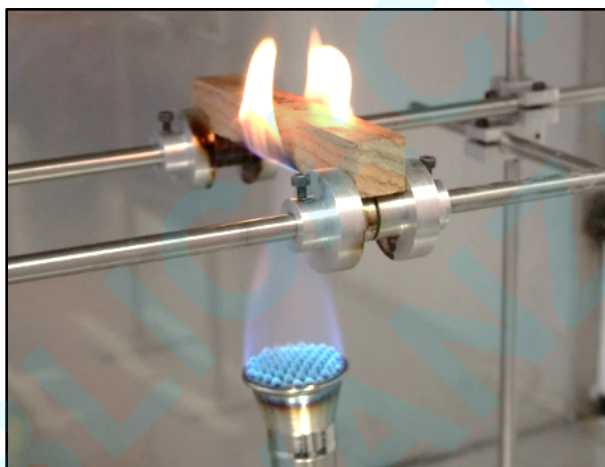


Figura 3. Dispositivo experimental para la evaluación de tiempo de ignición y la pérdida de masa en probetas de *Pinus pseudostrobus* mediante combustión directa.

El tiempo de ignición se definió como el intervalo hasta la aparición de ignición sostenida en al menos tres caras de la probeta durante ≥ 5 s, criterio operativo consistente con metodologías de ignición pilotada reportadas en la literatura (Esmailpour et al., 2020). Posteriormente, la probeta se retiró de la llama y se extinguió en una cama de arena; tras enfriarse, la superficie carbonizada se cepilló para eliminar el residuo suelto. La masa se registró antes (w_1 , g) y después (w_2 , g) del ensayo, y la pérdida de masa (Δm , %) se calculó mediante la ecuación siguiente (Gaff et al., 2019):

$$\Delta m = \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right) \times 100$$



Diseño experimental

El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar (DCA) con un factor fijo (tipo de aditivo) y tres niveles (MCn, MCc y MCb) con 22 repeticiones por tratamiento. El modelo estadístico se definió con la ecuación siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde,

Y_{ij} = valor observado de la variable de respuesta (tiempo de ignición o pérdida de masa) en la j -ésima repetición del i -ésimo tratamiento

μ = media

τ_i = efecto del i -ésimo tratamiento (tipo de material)

ε_{ij} = error experimental aleatorio asociado a cada observación, asumido con distribución normal, media cero y varianza constante.

Las variables respuesta fueron el tiempo de ignición (s) y la pérdida de masa (Δm , %). Los datos se analizaron mediante análisis de varianza de una vía (ANOVA), considerando el tratamiento como factor fijo, y las comparaciones múltiples se realizaron con la prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$). Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) con valores $p > 0.05$, por lo que se asumieron normalidad y homocedasticidad de los datos. El análisis estadístico se efectuó con STATGRAPHICS Centurion XIX (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, EUA).



Resultados y discusión

El comportamiento de los materiales compuestos frente al fuego se analizó a partir del tiempo de ignición y la pérdida de masa, variables que reflejan la resistencia a la ignición y la estabilidad térmica durante la combustión. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos (**Cuadro 1**), lo cual confirma que las mejoras observadas en el tiempo de ignición y la pérdida de masa son atribuibles al efecto de los aditivos y no a la variabilidad experimental. El material compuesto natural (MCn) presentó el menor desempeño, con ignición rápida y mayor degradación (**Cuadro 2**). Este comportamiento es consistente con la alta reactividad térmica de materiales lignocelulósicos sin protección, dominada por la liberación de compuestos volátiles durante la pirólisis (Lowden & Hull, 2013).

Cuadro 1. Análisis de varianza (ANOVA de una vía) y comparaciones múltiples del tiempo de ignición y pérdida de masa entre los tratamientos de materiales compuestos (MC) de aserrín de *Pinus pseudostrobus* (MCn = natural sin aditivo; MCc = 5 % de ceniza; MCb = 5 % de sales de boro).

Prueba / Fuente	Grupo / Comparación	Estadístico <i>F</i>	Valor <i>p</i>
Tiempo de ignición			
ANOVA	Entre grupos	41.16	< 0.001
	MCn – MCc	-3.41	0.009
Tukey HSD	MCn – MCb	-11.91	< 0.001
	MCc – MCb	-8.50	< 0.001
Pérdida de masa			
ANOVA	Entre grupos	72.25	< 0.001
Tukey HSD	MCn – MCc	1.99	< 0.001



MCn – MCb	3.98	< 0.001
MCC – MCb	1.99	< 0.001

Un valor F mucho mayor que 1 indica que la diferencia entre los grupos es mucho más grande que el error interno, lo que sugiere que al menos uno de los grupos es diferente a los demás. Un valor $p \leq 0.05$ indica diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Cuadro 2. Propiedades físicas y de reacción al fuego de los materiales compuestos de aserrín de *Pinus pseudostrobus*.

	Humedad (%)	Densidad (kg·m ⁻³)	Tiempo de ignición (s)	Pérdida de masa (%)
Material compuesto natural (MCn)				
Media	9	412	29	23
Desv. estándar	1	20	4	1
CV (%)	11	5	13	5
Material compuesto con 5 % de ceniza (MCC)				
Media	10	437	32	21
Desv. estándar	1	18	4	1
CV (%)	12	4	12	7
Material compuesto con 5 % de boro (MCB)				
Media	11	415	41	19
Desv. estándar	1	14	5	1
CV (%)	12	3	12	5

CV: Coeficiente de variación.

El adhesivo de harina de trigo (30 % respecto al aserrín) incrementa la carga combustible del sistema; su alto contenido de polisacáridos favorece la generación de compuestos volátiles durante la pirólisis, lo que puede contribuir a la rápida ignición y mayor pérdida de masa en MCn (Zong et al., 2020). Por ello, la respuesta al fuego depende del sistema aserrín–adhesivo. No obstante, su efecto se ve mitigado por los aditivos minerales, que favorecen la carbonización y reducen la liberación de compuestos volátiles inflamables (Lowden & Hull, 2013). En este contexto, MCC incrementó el tiempo de ignición y redujo la pérdida de masa, mientras que MCB mostró el mejor desempeño. La acción de los



aditivos puede relacionarse con su interacción con el material lignocelulósico: los boratos favorecen la formación de carbón, mientras que la ceniza puede formar una capa residual que actúa como barrera física y térmica (Uner et al., 2016; Puri et al., 2024).

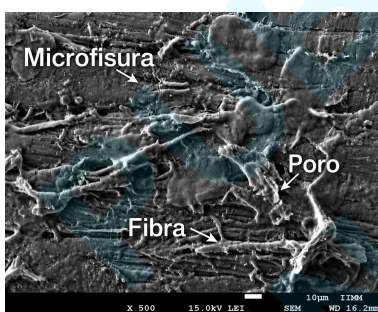
La densidad de los materiales se identifica como un factor relevante para una interpretación integral de los resultados. El incremento de aproximadamente 6 % observado en el material con ceniza (MCc) respecto al material natural (MCn) sugiere que la mejora moderada en la reacción al fuego podría estar asociada, al menos parcialmente, con efectos físicos derivados de una mayor densidad, tales como la reducción de la porosidad efectiva y la limitación en la difusión de oxígeno y compuestos volátiles. Este comportamiento es consistente con lo reportado para materiales lignocelulósicos, donde los incrementos en la densidad modificaron los mecanismos de transferencia de calor y masa, contribuyendo a retardar la ignición (Lowden & Hull, 2013). No obstante, dado que la densidad no fue evaluada como variable independiente en el diseño experimental, esta relación debe interpretarse como una asociación y no como un efecto causal directo.

En contraste, la densidad del MCb es prácticamente equivalente a la del MCn, lo que sugiere que las mejoras observadas en el tiempo de ignición y en la reducción de la pérdida de masa están relacionadas principalmente con los mecanismos químicos activos de los compuestos de boro, asociados con la modificación de las rutas de pirólisis, la promoción de reacciones de deshidratación y la formación de una matriz carbonosa más estable (Sotomayor Castellanos & Ávila Calderón, 2021).

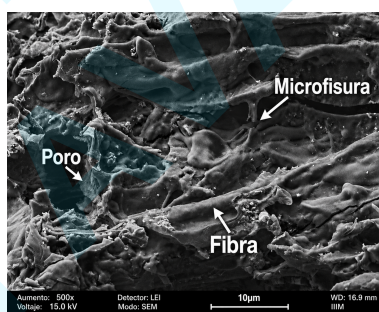
La comparación entre tratamientos evidencia que la mejora en el desempeño depende del tipo de aditivo y de su interacción con la matriz. En MCc, el incremento moderado del tiempo de ignición y la reducción de la pérdida de masa son consistentes con un efecto de la ceniza sobre el comportamiento de ignición, aunque el mecanismo específico depende de su composición y de su interacción con la matriz lignocelulósica (Ibe et al., 2015). En contraste, MCb presenta incremento sustancial de tiempo de ignición y la menor pérdida de masa, lo que indica mayor eficiencia en la estabilización térmica, atribuida a la modificación de las rutas de pirólisis y a la promoción de reacciones de deshidratación que favorecen la formación de carbón residual (Liu et al., 2020). Estos

resultados confirman que, aunque ambos aditivos mejoran la reacción al fuego, las sales de boro generan un efecto significativamente superior (Cavdar et al., 2015).

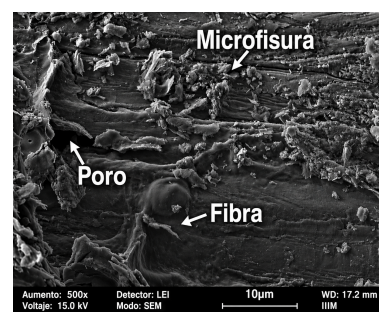
La interpretación mecanicista se sustenta en la integración de la microestructura (Figura 4), la composición química (Cuadro 3) y la distribución de tamaño de partícula (Figura 5; Cuadro 4). En MCn, la matriz lignocelulósica presenta porosidad y baja presencia de fases inorgánicas, lo que facilita la transferencia de calor y la liberación de volátiles, coherente con su menor tiempo de ignición y mayor pérdida de masa, comportamiento típico de materiales sin modificación (Renner et al., 2021). En MCc, la presencia de partículas minerales y la proporción alta de óxidos como CaO y SiO₂ favorecen la formación de capas inorgánicas que actúan como barrera térmica, de tal modo que reducen la conductividad efectiva y limitan la difusión de oxígeno, lo que retrasa la ignición (incremento del tiempo de ignición) y reduce la pérdida de masa. La granulometría (Figura 5) indica una mayor fracción de partículas finas, lo que puede favorecer la dispersión de la ceniza y contribuir a la formación de una capa residual más continua durante el calentamiento (Altuntaş et al., 2017; Asante et al., 2021). En conjunto, la evidencia microestructural y composicional es consistente con metodologías de caracterización en materiales lignocelulósicos que permiten vincular la distribución de fases con el comportamiento térmico (Mikac et al., 2018; Oladele et al., 2025).



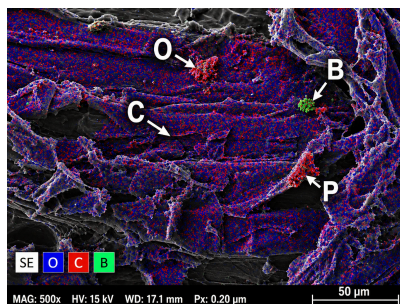
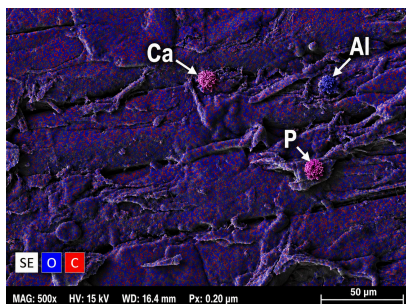
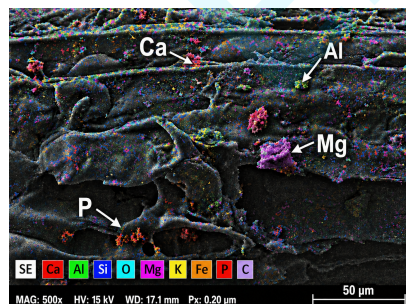
a) MCn



b) MCc



c) MCb





d) MCn

e) MCc

f) MCb

Figura 4. Microestructura (a, b y c) y distribución elemental (d, e y f) de los materiales compuestos (MC) a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* (MCn = natural sin aditivo; MCc = 5 % de ceniza; MCb = 5 % de sales de boro) observados mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (500x).

Cuadro 3. Composición química de la ceniza y de los materiales compuestos (MC) a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* (MCn = natural sin aditivo; MCc = 5 % de ceniza; MCb = 5 % de sales de boro) determinada por fluorescencia de rayos X.

Óxidos	Fórmula	Materiales (% en masa)			
		Ceniza	MCn	MCc	MCb
Óxido de calcio	CaO	69.0	29.0	62.1	32.6
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	2.86	21.2	6.0	18.3
Trióxido de azufre	SO ₃	7.9	9.4	3.4	8.3
Óxido de potasio	K ₂ O	12.4	10.0	10.6	8.8
Trióxido de hierro	Fe ₂ O ₃	2.06	7.1	6.1	7.5
Dióxido de silicio	SiO ₂	4.05	11	5.6	8.1
Dióxido de titanio	TiO ₂	1.1	3.6	1.9	5.1
Óxido de manganeso	MnO	3.83	1.6	0.8	1.6
Óxido de zinc	ZnO	0.13	1.7	0.6	1.3
Óxido de cobre	CuO	0.06	0.4	nd	nd
Óxido de estroncio	SrO	0.7	nd	0.6	nd
Trióxido de aluminio	Al ₂ O ₃	1.05	nd	1.3	4.2
Trióxido de molibdeno	MoO ₃	nd	nd	0.2	nd
Óxido de magnesio	MgO	nd	nd	nd	3.9

nd: óxido no detectado en concentraciones significativas.

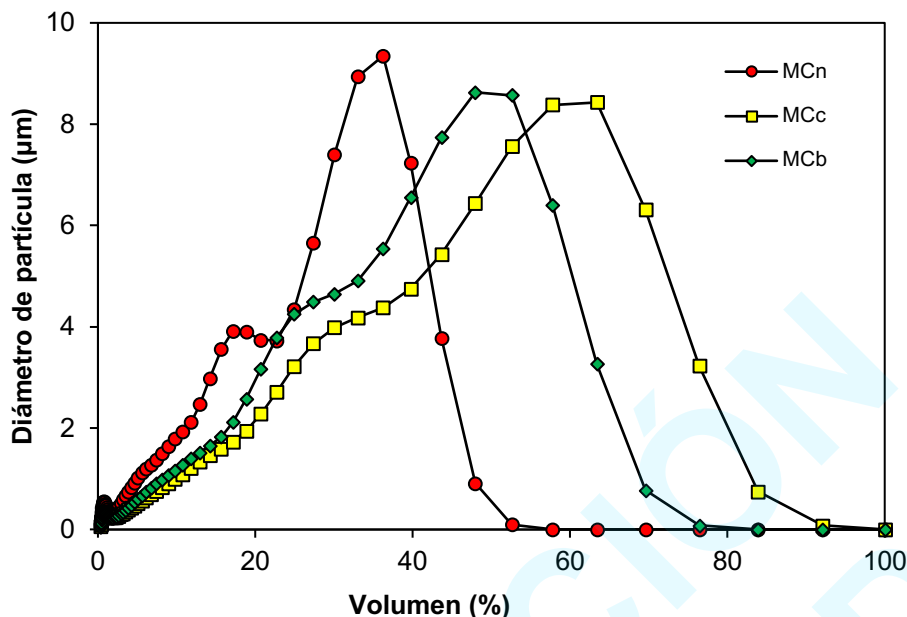


Figura 5. Distribución acumulativa del tamaño de partícula (por volumen) de los materiales compuestos (MC) a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* (MCn = natural sin aditivo; MCc = 5 % de ceniza; MCb = 5 % de sales de boro).

Cuadro 4. Distribución granulométrica de los materiales compuestos (MC) a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* (MCn = natural sin aditivo; MCc = 5 % de ceniza; MCb = 5 % de sales de boro). Los valores D_{10} , D_{25} , D_{50} , D_{75} y D_{90} corresponden al diámetro de partícula por debajo del cual se encuentra el 10, 25, 50, 75 y 90 % del volumen acumulado de partículas, respectivamente.

Diámetro partícula (µm)	MCn Volumen (%)	MCc Volumen (%)	MCb Volumen (%)
10	41	70	58
25	35	59	49
50	24	41	35
75	11	21	19
90	4	7	7

En MCb, la distribución homogénea de elementos como B y P (Figura 4f) sugiere impregnación adecuada del aditivo. Aunque la composición química incluye óxidos inorgánicos, su efecto retardante se explica principalmente por mecanismos químicos:



los boratos promueven reacciones de deshidratación que favorecen la formación de una matriz carbonosa estable, lo que limita la transferencia de calor y la liberación de gases combustibles, coherente con el mayor tiempo de ignición y menor pérdida de masa (Kumar et al., 2022). La distribución de partículas finas (Figura 5) incrementa la superficie específica y mejora la interacción aditivo–matriz, favoreciendo tanto la formación de carbón en fase sólida como la inhibición de reacciones en fase gaseosa, lo que explica su mayor eficacia (Shen et al., 2022).

Los resultados son consistentes con la literatura sobre retardantes en materiales lignocelulósicos, donde la mejora se asocia con la formación de carbón residual y la reducción de compuestos volátiles (Popescu & Pfriem, 2020). En el caso de la ceniza, su efecto como barrera mineral ha sido documentado, aunque con impacto moderado (Akaki et al., 2012). El incremento del tiempo de ignición (41 %) con sales de boro se sitúa dentro del rango reportado (20–60 %) por Kumar et al. (2022) y Uner et al. (2016) y la reducción de la pérdida de masa en 4 puntos porcentuales es consistente con las tendencias señaladas por Popescu y Pfriem (2020).

El comportamiento del boro se asocia con la modificación de la pirólisis y la formación de estructuras protectoras (Uner et al., 2016). No obstante, aunque los compuestos de boro muestran mayor eficacia, la ceniza representa una alternativa con ventajas en costo y sostenibilidad al provenir de residuos de biomasa (Akaki et al., 2012; Kairytė et al., 2020). La eficacia de ambos sistemas depende de la microestructura y la granulometría (Li et al., 2020; Rantuch et al., 2021).

El comportamiento de los compuestos frente al fuego está determinado por la capacidad del aditivo para modificar los procesos de degradación térmica y la transferencia de calor. La ceniza actúa principalmente como barrera física con un efecto moderado sobre el tiempo de ignición y pérdida de masa, mientras que las sales de boro inducen cambios químicos que favorecen la formación de carbón estable y reducen la liberación de volátiles, lo cual resulta en un desempeño significativamente superior (Mensah et al., 2023). Estos resultados confirman que la eficacia de los retardantes depende de la interacción entre composición, microestructura y granulometría, lo cual ha sido documentado en sistemas lignocelulósicos modificados con boratos (Pedieu et al., 2025).



Asimismo, la interpretación del desempeño frente al fuego debe considerar criterios derivados de metodologías de evaluación térmica (Schartel & Hull, 2007) y factores asociados a la estabilidad del material bajo condiciones de servicio (Sandinge et al., 2022), de tal modo que proporciona las bases para la selección de aditivos en el diseño de materiales lignocelulósicos con mejor reacción al fuego.

Los resultados deben interpretarse en función del método experimental empleado. El ensayo de combustión directa con ignición pilotada no corresponde a un método estandarizado de evaluación de la reacción al fuego y no permite un control preciso de la irradiancia ni del flujo de calor. En consecuencia, los valores de tiempo de ignición y pérdida de masa no son directamente comparables con datos obtenidos bajo condiciones normalizadas, sino que reflejan diferencias relativas entre tratamientos en un mismo entorno experimental. No obstante, la consistencia interna del protocolo permite la identificación de tendencias atribuibles al efecto de los aditivos, por lo que las conclusiones se circunscriben a comparaciones internas y su extrapolación a otros contextos debe realizarse con cautela.

Conclusiones

La incorporación de 5 % de ceniza de madera o de sales de boro modificó la reacción de los compuestos lignocelulósicos al fuego. La ceniza incrementó 11.9 % el tiempo de ignición y redujo la pérdida de masa en 2 puntos porcentuales, evidenciando un efecto moderado bajo las condiciones experimentales. En contraste, las sales de boro lograron incrementos del tiempo de ignición de 41 % y reducciones de 4 % de pérdida de masa, lo que evidencia mayor eficacia en la mejora de la reacción al fuego bajo las condiciones evaluadas. Estas diferencias se asocian con la acción química de los boratos sobre la pirólisis, frente al efecto predominantemente físico de la ceniza. En términos comparativos, las sales de boro constituyen el aditivo más eficiente, mientras que la



ceniza representa una alternativa viable con ventajas en sostenibilidad. En conjunto, estos resultados establecen criterios cuantitativos para la selección de aditivos en el diseño de compuestos lignocelulósicos con mejor reacción al fuego.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores utilizaron las herramientas QuillBot y ChatGPT para verificar la gramática y mejorar la fluidez del texto. Los autores revisaron y editaron el contenido y asumen la responsabilidad por la integridad y precisión del trabajo publicado.

Referencias

- Akaki, T., Maehara, H., & Tooyama, M. (2012). Development of wood and wood ash-based hydroxyapatite composites and their fire-retarding properties. *Journal of Wood Science*, 58(5), 532–537. <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1276-4>
- Altuntaş, E., Karaoğul, E., & Alma, M. H. (2017). Investigation of the fire, thermal, and mechanical properties of zinc borate and synergic fire retardants on composites produced with PP-MDF wastes. *BioResources*, 12(4), 6971–6983. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.6971-6983>
- Aniza, R., Chen, W., Kwon, E. E., Bach, Q., & Hoang, A. T. (2024). Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis toward zero carbon scheme: A critical review. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100538. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538>



Asante, B., Schmidt, G., Teixeira, R., Krause, A., & Savastano, H., Jr. (2021). Influence of wood pretreatment and fly ash particle size on the performance of geopolymer wood composite. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 597–609. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01671-9>

ASTM International. (2020). *ASTM B822-20. Standard test method for particle size distribution of metal powders and related compounds by light scattering*. <https://doi.org/10.1520/B0822-20>

Ayrilmis, N. (2020). Effects of various fire retardants on mechanical and fire properties of plywood. *Materials Testing*, 62(7), 685–690. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2020/7/292>

Babrauskas, V. (2025). The cone calorimeter. In M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr., K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. L. Torero, J. M. Watts Jr., & C. J. Wieczorek (Eds.), *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed., pp. 952–980). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-59212-6>

Béguerie, T., Weiss-Hortala, E., Lyczko, N., & Nzihou, A. (2023). The mechanisms of calcium-catalyzed graphenization of cellulose and lignin biochars uncovered. *Scientific Reports*, 13, 11390. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38433-x>

Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., & Ashraf, M. (2022). Densification of timber: A review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*, 68(20). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>

Cavdar, A. D., Mengeloğlu, F., & Karakus, K. (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high-density polyethylene composites. *Measurement*, 60, 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078>

Edoziuno, F., & Akaluzia, R. (2024). Analytical investigation of microcrystalline wood charcoal reinforced polyester composites using ED-XRF, FTIR and SEM-EDS techniques. *Gazi University Journal of Science*, 37(1), 44–52. <https://doi.org/10.35378/gujs.794837>

Esmailpour, A., Majidi, R., Taghiyari, H. R., Ganjkhani, M., Mohseni Armaki, S. M., & Papadopoulos, A. N. (2020). Improving fire retardancy of beech wood by graphene. *Polymers*, 12(2), 303. <https://doi.org/10.3390/polym12020303>



- Fang, Y., Wang, Q., Guo, C., Song, Y., & Cooper, P. A. (2013). Effect of zinc borate and wood flour on thermal degradation and fire retardancy of polyvinyl chloride composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.12.028>
- Ferdosian, F., Pan, Z., Gao, G., & Zhao, B. (2017). Bio-based adhesives and evaluation for wood composites application. *Polymers*, 9(2), 70. <https://doi.org/10.3390/polym9020070>
- Gaff, M., Kačík, F., Gašparík, M., Todaro, L., Jones, D., Corleto, R., Osvaldová, L. M., & Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak wood. *Construction and Building Materials*, 200, 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.106>
- Glushkov, D., Zhuikov, A., Zemlyansky, N., Pleshko, A., Fetisova, O., & Kuznetsov, P. (2023). Influence of the composition and particle sizes of the fuel mixture of coal and biomass on the ignition and combustion characteristics. *Applied Sciences*, 13, 11060. <https://doi.org/10.3390/app131911060>
- Ibe, K. A., Mbonu, J. I., & Umukoro, G. K. (2015). The effects of wood ash on ignition point of wood. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9(6), 1579–1582. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1109421>
- International Organization for Standardization. (2011). *ISO 12677:2011. Chemical analysis of refractory products by X-ray fluorescence (XRF): Fused cast-bead method*. <https://www.iso.org/standard/51445.html>
- International Organization for Standardization. (2014a). *ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood—Test methods—Part 1*. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- International Organization for Standardization. (2014b). *ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood—Test methods—Part 2*. <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 5660-1:2015. Reaction-to-fire tests—Cone calorimeter method*. <https://www.iso.org/standard/57957.html>



International Organization for Standardization. (2020). *ISO 13320:2020. Particle size analysis—Laser diffraction methods*. <https://www.iso.org/standard/69111.html>

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 18122:2022. Solid biofuels—Determination of ash content*. <https://www.iso.org/standard/83190.html>

Kairytė, A., Kremensas, A., Vaitkus, S., Członka, S., & Strąkowska, A. (2020). Fire suppression and thermal behavior of biobased rigid polyurethane foam filled with biomass incineration waste ash. *Polymers*, 12(3), 683. <https://doi.org/10.3390/polym12030683>

Kumar, R., Gunjal, J., & Chauhan, S. (2022). Effect of borax–boric acid and ammonium polyphosphate on flame retardancy of natural fiber polyethylene composites. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 24, 1–10. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100434>

Li, H., Ma, X.-X., Gu, Z.-C., Wang, X., Li, J.-Z., Jiang, J., Fei, B.-H., & Yang, Z.-B. (2020). Pyrolysis and combustion characteristics of boric acid and borax treated decorative bamboo filaments. *BioResources*, 15(4), 8146–8160. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8146-8160>

Lin, M., Guo, X., Xu, Y., Zhang, X., & Hu, D. (2024). A top-down approach to the fabrication of flame-retardant wood aerogel with in situ-synthesized borax and zinc borate. *Materials*, 17(11), 2638. <https://doi.org/10.3390/ma17112638>

Liu, Q., Chai, Y., Ni, L., & Lyu, W. (2020). Flame retardant properties and thermal decomposition kinetics of wood treated with boric acid modified silica sol. *Materials*, 13(20), 4478. <https://doi.org/10.3390/ma13204478>

Lowden, L. A., & Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, 2, 4. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>

Mensah, R. A., Jiang, L., Renner, J. S., & Xu, Q. (2023). Characterization of the fire behavior of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 1407–1422. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>

Mikac, U., Serša, I., Žlahtič Zupanc, M., Humar, M., Merela, M., & Oven, P. (2018). Application of MR microscopy for research in wood science. *Microporous and Mesoporous Materials*, 269, 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.03.025>



- Oladele, I. O., Ajayi, M. A., Taiwo, A. S., Ajileye, J. O., Oyegunna, S. A., & Orisawayi, A. O. (2025). Constituents, morphological and thermal stability characteristics of wood ash and wood charcoal microparticles for composites application. *Next Materials*, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101045>
- Pedieu, R., Bentis, A., Riedl, B., Wang, X.-M., Deng, J., Braghiroli, F. L., & Koubaa, A. (2025). Enhancing fire resistance and mechanical properties of wood strand boards by impregnation with sodium bicarbonate and sodium borate. *Polymers*, 17(21), 2943. <https://doi.org/10.3390/polym17212943>
- Popescu, C.-M., & Pfriem, A. (2020). Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood-based products—An overview. *Fire and Materials*, 44(1), 100–111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>
- Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, 2, 1378361. <https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
- Rantuch, P., Martinka, J., & Ház, A. (2021). The evaluation of torrefied wood using a cone calorimeter. *Polymers*, 13, 1748. <https://doi.org/10.3390/polym13111748>
- Renner, J. S., Mensah, R. A., Jiang, L., Xu, Q., Das, O., & Berto, F. (2021). Fire behavior of wood-based composite materials. *Polymers*, 13, 4352. <https://doi.org/10.3390/polym13244352>
- Sandinge, A., Blomqvist, P., Sørensen, L. S., & Dederichs, A. (2022). The effect of accelerated ageing on reaction-to-fire properties of composite materials. *Fire Technology*, 58, 1305–1332. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01197-9>
- Schartel, B., & Hull, T. R. (2007). Development of fire-retarded materials—Interpretation of cone calorimeter data. *Fire and Materials*, 31(5), 327–354. <https://doi.org/10.1002/fam.949>
- Shen, J., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., & Wang, S. (2022). The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites. *Polymers*, 14(1), 82. <https://doi.org/10.3390/polym14010082>



Sotomayor Castellanos, J. R., & Ávila Calderón, L. E. A. (2021). Reacción al fuego de tres maderas angiospermas impregnadas con sales de boro. *Revista Tecnológica ESPOL*, 33(1). <https://doi.org/10.37815/rte.v33n1.818>

Toker, H., Baysal, E., Şimşek, H., Şenel, A., Sönmez, A., Altınok, M., & Yapıcı, F. (2009). Effects of some environmentally-friendly fire-retardant boron compounds on modulus of rupture and modulus of elasticity of wood. *Wood Research*, 54(1), 77–88. <https://www.woodresearch.sk/wr/200901/08.pdf>

Uner, I. H., Deveci, I., Baysal, E., Turkoglu, T., Toker, H., & Peker, H. (2016). Thermal analysis of oriental beech wood treated with some borates as fire retardants. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 18(2), 293–304. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2016005000027>

Zong, P., Jiang, Y., Tian, Y., Li, J., Yuan, M., Ji, Y., Chen, M., Li, D., & Qiao, Y. (2020). Pyrolysis behavior and product distributions of biomass six group components: Starch, cellulose, hemicellulose, lignin, protein and oil. *Energy Conversion and Management*, 216, 112777. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112777>