



Prototipo de quemador de residuos para la mitigación de emisiones de CO y CO₂ en la industria carpintera de Puerto Maldonado, Perú

Javier NAVIO-CHIPA ¹, Carlos Alfonso LÓPEZ-MESTANZA ¹,
Percy Amílcar ZEVALLOS-POLLITO ², Leif Armando PORTAL-CAHUANA ³

¹ Consultor independiente, Puerto Maldonado, Perú.

² Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú.

³ Instituto de Investigación en Forestería y Ecosistemas Tropicales, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.

*E-mail: leif.portal@untrm.edu.pe

Enviado el: 29/11/2024; Aceptado: 20/05/2025; Publicado el: 28/05/2025.

RESUMEN: Las microempresas carpinteras generan grandes cantidades de residuos de madera que, en muchos casos, son desperdiciados o quemados al aire libre, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental. En este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la capacidad de un quemador prototípico para reducir las emisiones de CO y CO₂ derivadas de la combustión de estos residuos en Puerto Maldonado, Madre de Dios. Para ello, se caracterizaron los tipos más comunes de residuos de madera en las carpinterías locales y se llevaron a cabo pruebas de combustión, tanto al aire libre como utilizando el prototípico de quemador. Se registraron datos sobre la temperatura y las emisiones de gases contaminantes generados en ambos escenarios. Los resultados demostraron que el quemador prototípico produjo energía calorífica limpia, lo que sugiere su viabilidad como solución para aplicaciones en cámaras de secado de madera en pequeñas carpinterías. Este estudio aporta evidencia valiosa sobre la eficacia del quemador prototípico en la reducción de la contaminación ambiental por emisiones de CO y CO₂, ofreciendo una solución sostenible al problema de manejo de residuos en la industria carpintera.

Palabras-clave: combustión de residuos; contaminación atmosférica; eficiencia energética; gestión de residuos; microempresas carpinteras; sostenibilidad ambiental.

Protótipo de queimador de resíduos para a mitigação das emissões de CO e CO₂ na indústria de marcenaria de Puerto Maldonado, Peru

RESUMO: As microempresas de marcenaria geram grandes quantidades de resíduos de madeira, que em muitos casos são descartados de forma indevida ou queimados ao ar livre, contribuindo significativamente para a poluição ambiental. Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi avaliar a capacidade de um queimador protótipo para reduzir as emissões de CO e CO₂ resultantes da combustão desses resíduos de marcenarias, em Puerto Maldonado, Madre de Dios, Peru. Para isso, foram caracterizados os tipos mais comuns de resíduos de madeira nas marcenarias locais e realizados testes de combustão, tanto ao ar livre quanto utilizando o protótipo de queimador. Foram registrados dados sobre a temperatura e as emissões de gases poluentes gerados em ambos os cenários. Os resultados mostraram que o queimador protótipo produziu energia térmica limpa, o que sugere sua viabilidade como solução para câmaras industriais de secagem de madeira em pequenas marcenarias. Este estudo fornece evidências valiosas sobre a eficácia do queimador protótipo na redução da poluição ambiental por emissões de CO e CO₂, oferecendo uma solução sustentável para o problema do gerenciamento de resíduos em marcenarias.

Palavras-chave: combustão de resíduos; eficiência energética; gestão de residuos; microempresas de marcenaria; poluição atmosférica; sustentabilidade ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

La quema de residuos de madera en las microempresas carpinteras es una práctica común que contribuye significativamente a la contaminación del aire, lo que genera un impacto negativo tanto en la salud pública como en el medio ambiente local (MICHALSKI et al., 2018). La industria del mueble, por ejemplo, que produce una cantidad considerable de residuos derivados de la madera, enfrenta dificultades para disponer de estos materiales de manera

adecuada debido a la presencia de aditivos químicos que incrementan la emisión de compuestos peligrosos durante la combustión (GAZE et al., 2023). Para mitigar estos efectos, se han explorado diversas soluciones, como el uso de aditivos catalíticos que reducen las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en los procesos de combustión de los residuos de madera (DIEDERICHS, 2015). Además, la implementación de sistemas de ventilación por extracción ha demostrado ser eficaz para controlar el

polvo de madera y otros contaminantes en los lugares de trabajo, mejorando así las condiciones laborales y reduciendo la exposición de los trabajadores a sustancias nocivas (VON et al., 2012). En conjunto, estas medidas buscan mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud asociados a la industria carpintera (KOHNE SHAHRI et al., 2017).

En cuanto a la combustión de biomasa, varios estudios previos han abordado el diseño de quemadores eficientes y las estrategias para reducir las emisiones de gases contaminantes, subrayando la necesidad de soluciones innovadoras en este ámbito (DERNBECHER et al., 2019; GARCÍA-SÁNCHEZ et al., 2020; TUCKI et al., 2020; VARINY et al., 2021; OZGEN et al., 2021). Estos estudios proporcionan una visión completa sobre la combustión de biomasa, abarcando tanto los combustibles fósiles como los derivados de la biomasa utilizados en calderas de grandes centrales eléctricas y hornos industriales (VARINY et al., 2021). Además, se han evaluado los impactos ambientales de la combustión de biomasa en pequeños electrodomésticos, enfocándose en las emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno (OZGEN et al., 2021). Estos autores concluyen que, aunque la biomasa es una fuente renovable y menos contaminante en términos de CO_2 , su combustión en estos dispositivos puede generar emisiones significativas de contaminantes dañinos para la calidad del aire, como partículas finas y NO_x .

La cantidad de NO_x emitida depende del contenido de nitrógeno del combustible y de las condiciones de combustión, lo que exige tecnologías específicas para su control. También se ha estudiado la combustión en hogares con dispositivos de calefacción de bajas emisiones que usan biomasa forestal (TUCKI et al., 2020). Estos autores concluyen que, pese a que la biomasa genera emisiones, los dispositivos analizados presentan alta eficiencia y emisiones bajas de monóxido de carbono y partículas. Además, el tipo de biomasa influye en las emisiones, siendo las astillas de pino las que generan niveles ligeramente mayores. En general, estos sistemas ofrecen una combustión limpia y eficiente con menor impacto ambiental. Por último, se ha destacado el potencial de optimizar los sistemas de combustión de biomasa mediante simulaciones numéricas, lo que permitiría mejorar el diseño, la eficiencia operativa y el control de emisiones (DERNBECHER et al., 2019; GARCÍA-SÁNCHEZ et al., 2020).

En la región de Madre de Dios, las microempresas carpinteras enfrentan condiciones particulares que agravan el problema de las emisiones contaminantes. La industria maderera de esta región contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la deforestación, lo que genera impactos ambientales de gran magnitud (MICHALSKI et al., 2018). La industria maderera en Madre de Dios es fundamental para los objetivos energéticos y ambientales del país, y es crucial que los actores involucrados comprendan las interrelaciones entre este sector y otros, así como las implicaciones ambientales de sus decisiones (ARQUÍNIGO et al., 2021). Investigaciones en los distritos de Calleria, Manantay y Yarinacocha en Perú han revelado que las empresas madereras de estas áreas, concentradas principalmente en Manantay, generan un alto impacto ambiental. Entre las principales preocupaciones se encuentran las enfermedades respiratorias y el vertido de desechos (DIEDERICHS, 2015). Por ello, es fundamental abordar la problemática de las microempresas carpinteras en

Puerto Maldonado, promoviendo prácticas sostenibles y reduciendo los efectos negativos en el medio ambiente.

En este contexto, y considerando los desafíos ambientales y de salud derivados de las emisiones de CO y CO_2 en la industria carpintera de la región, resulta imperativo abordar estos problemas de manera efectiva. Este estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de un quemador prototípico para mitigar las emisiones de CO y CO_2 generadas durante la combustión de residuos de madera en microempresas carpinteras en Puerto Maldonado, Madre de Dios. Al comprender mejor el impacto potencial de esta tecnología, se espera avanzar hacia prácticas más sostenibles en la industria carpintera, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública, tanto en Puerto Maldonado como en otras ciudades.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de Estudios

El presente estudio se llevó a cabo en la ciudad de Puerto Maldonado, ubicada en la región de Madre de Dios, conocida como la "capital de la biodiversidad del Perú". Esta región, considerada una de las más biodiversas del mundo, alberga una gran variedad de ecosistemas (FOSTER et al., 1994). Madre de Dios se encuentra a una altitud promedio de 250 metros sobre el nivel del mar y presenta una temperatura media anual de 25°C. En cuanto a las precipitaciones, estas oscilan entre 2200 y 2400 mm anuales (PORTAL-CAHUANA et al., 2023), con un notable descenso durante la temporada seca, que va de julio a septiembre, periodo en el cual las lluvias son significativamente menores, alcanzando un promedio inferior a 100 mm (ARAUJO et al., 2011).

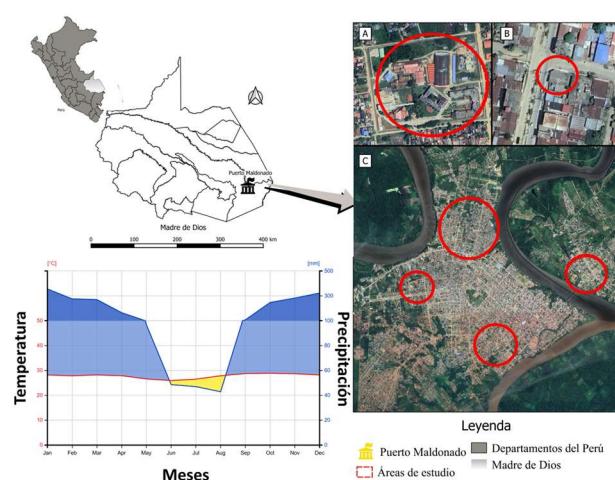


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Se muestra imágenes de la ciudad de Puerto Maldonado donde los círculos rojos señalan las zonas de estudio. También se proporciona un diagrama climático para el periodo 1993-2022 (ZEPNER et al., 2021).

Figure 1. Location of the study area. Images of Puerto Maldonado are shown, where red circles indicate the study zones. A climate diagram for the period 1993-2022 is also provided (ZEPNER et al., 2021).

2.2. Recolección de los Residuos de especies Maderables

Para la recolección de los residuos maderables, se seleccionó aleatoriamente el 12% de las 200 microempresas carpinteras (MiPyMEs) registradas y activas en la ciudad de Puerto Maldonado, según el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. En total, se incluyeron 24

carpinterías en el muestreo. Se realizó un levamiento de información para identificar las especies de madera más utilizadas, tanto de manera mensual como anual, en cada carpintería. Para ello, se aplicó una encuesta que recopilaba información sobre el volumen de madera adquirido durante el año por cada establecimiento. A partir de los datos obtenidos, se seleccionaron las cuatro especies de madera más comunes, que representaban al menos el 70% del volumen promedio de uso en las Micro, Pequeña y Mediana Empresa (MiPyMEs) del sector, y que, por lo tanto, generaban los residuos más frecuentes.

La recolección de muestras de los residuos se llevó a cabo de manera aleatoria en diversas carpinterías (Figuras 2A a 2C), donde se colectaron ~10 kilos de residuos de madera por cada carpintería, lo que se totalizó en ~240 kilos de residuos de madera de las principales especies (Tabla 2). Los residuos fueron secados al aire libre y luego almacenados en un espacio cubierto durante 60 días, con el fin de homogenizar su contenido de humedad. Posteriormente, las muestras recolectadas fueron enviadas al Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, donde se realizó la identificación anatómica a nivel macroscópico. Este proceso se llevó a cabo siguiendo los protocolos y estándares internacionales establecidos por la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) y la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA). La identificación se basó en la observación detallada de características macroscópicas de la madera, tales como textura, color, patrón y distribución de los poros, tipo de tejido parenquimático y otros rasgos anatómicos visibles a simple vista o mediante microscopio estereoscópico, permitiendo la identificación de las especies comerciales. Para medir el porcentaje de humedad de los residuos, se utilizó un medidor de humedad portátil Nigos, modelo RVD-904 (Figura 2D).

Se seleccionaron residuos con una longitud máxima de 30 cm, con el objetivo de asegurar su adecuación a la cámara de combustión del quemador prototipo. Mediante ensayos preliminares, se determinó el peso máximo que podía ser acomodado en la cámara de combustión, garantizando así una duración mínima de 30 minutos del proceso de quema de la mezcla de especies. Para el pesaje, se habilitó un área específica, donde las muestras fueron embolsadas y codificadas. El pesado se realizó utilizando una balanza electrónica, con una precisión de 0.01 g, y cada muestra fue etiquetada con un código para su identificación.

Se prepararon un total de cinco muestras para cada tratamiento, lo que resultó en 75 muestras destinadas a la combustión en el quemador prototipo. Cada bolsa contenía una mezcla equilibrada de especies y peso, con un total de 3 kg de residuos que se utilizó como biomasa para la combustión en el quemador.

2.3. Construcción del quemador-prototipo

La construcción del quemador prototipo (Figura 3) se llevó a cabo siguiendo un proceso detallado y cuidadosamente planificado, con los siguientes pasos: En primer lugar, se elaboró una maqueta de madera y triplay con el objetivo de evaluar las dimensiones adecuadas y la manipulación de los residuos durante el proceso de combustión. Para observar el movimiento de los gases de combustión, se utilizó humo como indicador. En cuanto a los materiales, se optó por una plancha de hierro de 6 mm de

espesor, con dimensiones de 1.22 m (ancho) x 2.44 m (largo), buscando mantener un enfoque económico en la construcción.



Figura 2. El proceso involucró A) una encuesta a los carpinteros, B) recolección de residuos, C) secado de los residuos bajo cubierta y D) control del contenido de humedad.

Figure 2. The process involved A) a survey of carpenters, B) waste collection, C) waste drying under cover, and D) moisture content control.

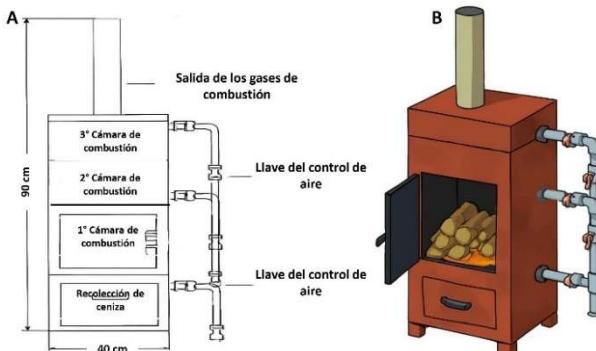


Figura 3. Diseño del quemador prototipo. A) Esquema con sus principales componentes. B) Representación en 3D.

Figure 3. Prototype burner design. A) Diagram showing its main components. B) 3D representation.

La cámara de combustión fue situada en la parte inferior del quemador, donde se instaló una rejilla de quemado fabricada con varillas de hierro corrugado de 12 mm de diámetro, separadas entre sí por 1.5 cm. Esta disposición permitió una caída eficiente de las cenizas hacia el colector dispuesto debajo de la rejilla. El colector de cenizas, una cajuela cerrada pero removible, facilitó la eliminación de las cenizas acumuladas. Además, la cámara de combustión contaba con una puerta frontal, equipada con una sub puerta más pequeña destinada al control del oxígeno. Esta sub puerta se mantuvo ligeramente abierta durante todo el proceso de quema, con una abertura de 3 cm, asegurando así un flujo de aire constante para la combustión eficiente de la mezcla de especies maderables.

La construcción de la campana o colector de gases de combustión se realizó utilizando latón de 1.5 mm de espesor. Esta campana fue diseñada con forma piramidal cuadrada,

con lados de 1.0 m y una altura de 75 cm en la cúspide. Las paredes de la campana fueron inclinadas a 45° respecto a la horizontal para optimizar la extracción de los gases. En la parte superior de la campana, se incorporó una salida de gases de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura, donde se instalaron los dispositivos de medición de gases.

Para garantizar una ventilación adecuada durante la combustión, la campana piramidal fue elevada 30 cm del suelo mediante la colocación de barras de hierro de 12 mm en cada vértice de la base. Finalmente, la muestra de residuos maderables se dispuso sobre una superficie de cemento para su combustión.

2.4. Quemador prototipo

El quemador prototipo, en su fase final, adoptó una estructura rectangular con una base de 40 cm (ancho) x 40 cm (largo) y una altura de 90 cm. Su diseño consistía en una cámara-base principal destinada a la combustión de las muestras de residuos maderables. Sobre esta base se añadieron dos cámaras adicionales para la poscombustión, formando una columna vertical de combustión y poscombustión. La primera cámara, correspondiente a la combustión primaria, contaba con una puerta frontal para facilitar la introducción de la muestra, la cual permanecía cerrada durante el proceso de quemado.

En la parte inferior de la cámara de combustión se instaló una rejilla que soportaba la muestra y permitía la caída de las cenizas hacia una caja de recolección, cuyas dimensiones eran 40 cm (ancho) x 40 cm (largo) x 20 cm (alto). Las dimensiones de la cámara de combustión principal eran de 40 cm (ancho) x 40 cm (largo) x 60 cm (alto), mientras que las cámaras de poscombustión tenían dimensiones de 40 cm (ancho) x 40 cm (largo) x 10 cm (altura). Las conexiones entre las cámaras fueron realizadas mediante soldadura, lo que permitía la circulación del aire, ya sea natural o forzado, a través de una ranura de 40 cm (largo) x 4 cm (ancho). Estas aberturas no estaban alineadas, lo que aseguraba que el aire circulante recorriera adecuadamente todo el espacio de la cámara y alcanzara la ranura de ingreso a la siguiente cámara o la abertura de salida al exterior del prototipo.

La salida de los gases hacia el exterior se efectuaba mediante una abertura circular de 76 mm de diámetro. Para proteger los equipos de medición de CO y CO₂ de las altas temperaturas, se instaló un conducto cuadrado de 2 cm (ancho) x 3 cm (espesor) y 12 m de longitud, con una inclinación de 15 grados respecto a la horizontal. En el extremo de este conducto se colocaron los medidores de CO y CO₂, así como las conexiones a un equipo de registro compuesto por cables, transductores y una laptop.

El quemador prototipo permitía el ingreso de aire de manera libre desde la base de la cámara de combustión. Además, para forzar el flujo de aire hacia las cámaras de poscombustión, se instalaron tubos de fierro galvanizado de 12 mm de diámetro y 40 cm de largo, con orificios de 3 mm para distribuir el aire de forma uniforme. Estos tubos se conectaron al exterior mediante codos y tuberías, y se unieron a una compresora de suministro de aire forzado. Para regular el flujo de aire, se instalaron llaves de paso en las tuberías, justo antes de cada cámara. El quemador fue fabricado utilizando planchas de hierro de 6 mm de espesor.

El equipo utilizado en este estudio incluyó dispositivos y herramientas esenciales para el desarrollo y la medición de los procesos dentro del quemador. Entre estos, se destacó una compresora de aire de 50 litros de capacidad y 2.5 HP de

potencia, equipada con un regulador de presión y un sistema automático de encendido y apagado para la inyección de aire al quemador. También se utilizó un Mini Termo-Anemómetro para medir la velocidad de insuflado del aire. Para monitorear la concentración de CO₂ y otros parámetros, se empleó un detector portátil de CO₂. Además, se instaló un sensor de monóxido de carbono (MQ7) para medir su concentración en el aire, y una termocupla tipo K para medir la temperatura a la salida de los gases de la última cámara del prototipo. Finalmente, se implementó un sistema de medición de gases, compuesto por un módulo emisor y un receptor, diseñado para medir las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y la temperatura de los gases a la salida del quemador prototípico.

2.5. Procedimiento de Quemado de Muestras

El estudio consideró dos procedimientos independientes para la combustión de las muestras de madera.

En el primer procedimiento, las muestras destinadas al quemador prototípico fueron colocadas de forma aleatoria sobre la parrilla de la cámara de combustión. La ignición se realizó con una pequeña antorcha impregnada en petróleo diésel, manteniendo la puerta de la cámara ligeramente abierta con una ranura de aproximadamente 3 cm para permitir un adecuado flujo de aire que facilitara la combustión (Figuras 4A, 4B y 4C). Durante esta etapa, se empleó una compresora de aire, se revisó el colector de cenizas y se instalaron sensores para la medición de gases de combustión como CO y CO₂.

El segundo procedimiento consistió en el quemado al aire libre, utilizado como testigo, donde se colocaron muestras diferentes directamente bajo la cúspide de una campana colectora. La ignición también se llevó a cabo con una antorcha humedecida en petróleo diésel, permitiendo la observación de la combustión en condiciones abiertas (Figura 4D).



Figura 4. A) Llenado de residuos y ubicación de la compresora de aire. B) Revisando el colector de cenizas. C) Ubicación de los sensores de gases de combustión CO y CO₂. D) Quemado al aire libre, utilizando la campana colectora.

Figure 4. A) Filling of residues and location of the air compressor. B) Inspecting the ash collector. C) Location of the combustion gas sensors for CO and CO₂. D) Open-air burning using the collecting hood.

2.6. Diseño de la Experimentación

El diseño experimental se estructuró con el objetivo de establecer las relaciones causa-efecto derivadas de las modificaciones deliberadas en el número de cámaras del

quemador prototipo y sus diferentes combinaciones, considerando dos tipos de ingreso de aire, los cuales fueron definidos como tratamientos. Se evaluaron dos variables dependientes principales: la emisión de CO y CO₂, así como una variable secundaria, la temperatura de salida en el quemador prototipo.

Se optó por un diseño experimental completamente aleatorizado, lo que permitió que cualquier residuo de cualquier especie y de cualquier carpintería pudiera ser incluido en cualquier bolsa de mezcla destinada a la combustión, y repetido en cualquier tratamiento. Para asegurar la homogeneidad de las condiciones experimentales, se ajustaron tanto el contenido de humedad de las muestras como el peso de cada especie en la mezcla, con el fin de obtener un peso constante de 3.0 kg por muestra de ensayo.

2.7. Tratamientos Considerados en la Experimentación

Los tratamientos fueron diseñados en función de diversas condiciones experimentales, resultando en un total de 14 tratamientos, además de un testigo. Estos tratamientos, que se detallan en la Tabla 1, combinan diferentes configuraciones de cámaras del quemador prototipo y métodos de ingreso de aire. Estos tratamientos fueron sometidos a análisis y comparación para evaluar su impacto en los resultados experimentales.

Tabla 1. Tratamientos considerados en la experimentación.

Table 1. Treatments considered in the experimental design. N° Tr. = número de tratamiento.

Nº Tr.	Cámaras del Quemador	Ingreso de aire
Nº	Nº tipo de Cámaras	
1	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
2	1 Cámara de combustión	Con insuflado
3	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
4	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
5	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
6	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
7	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
8	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Con insuflado
9	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
10	1 Cámara de combustión	Sin insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Con insuflado
11	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
12	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
13	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Con insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Con insuflado
14	1 Cámara de combustión	Con insuflado
	2 Cámara de pos combustión	Sin insuflado
	3 Cámara de pos combustión	Con insuflado
15	1 Referencia: Quemado de la	Captura de

2.8. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos recolectados, se utilizaron cinco repeticiones para cada tratamiento. Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Previamente al ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad (con la prueba de Shapiro-Wilk), homogeneidad de varianzas (con la prueba de Levene) e independencia de las observaciones, garantizada por el diseño experimental completamente aleatorizado.

Para las comparaciones múltiples entre medias se aplicó la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95%. Los análisis estadísticos se realizaron en el software R (R Core Team, 2025), utilizando paquetes básicos como stats para ANOVA y pruebas de normalidad, car para la prueba de homogeneidad de varianzas, y agricolae para la prueba de Tukey. Además, para la generación de gráficos descriptivos se empleó el paquete ggplot2.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de la encuesta y selección de especies de madera más utilizadas por los carpinteros

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta revelan las principales especies de madera empleadas por los carpinteros en la ciudad de Puerto Maldonado (Tabla 2). Entre las más destacadas se encuentra el Tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke), que ocupa el primer lugar con un 35.58% del uso anual, seguido por el Ishpingo (*Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Sm.), que representa el 18.66%. Otras especies como la Moena (*Ocotea* spp.) y el Quillabordon (*Aspidosperma parvifolium* A. DC.) también son utilizadas de manera significativa, con un 15.49% y 15.21%, respectivamente. En conjunto, otras especies de madera representan el 15.06% del total anual, lo que refleja la diversidad en las preferencias de los carpinteros locales.

Estos resultados brindan información clave sobre las preferencias y prácticas de los carpinteros en la región de Puerto Maldonado (Tabla 2), lo que puede ser útil para comprender las tendencias de uso de maderas en el sector de la carpintería local.

Tabla 2. Especies de madera más frecuentemente empleadas en las carpinterías MiPyME de la ciudad de Puerto Maldonado durante el año 2018.

Table 2. The most commonly used wood species was in the MiPyME carpentry workshops in Puerto Maldonado in 2018.

Nº	Nombre Científico	Nombre Común	Uso anual (%)
1	<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke	Tornillo	35.58
2	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C. Sm.	Ishpingo	18.66
3	<i>Ocotea</i> spp.	Moena	15.49
4	<i>Aspidosperma parvifolium</i> A. DC.	Quillabordon	15.21
5	Siete especies forestales	Otras especies	15.06
		Total	100

3.2. Emisiones de monóxido de carbono (CO)

Antes de realizar el ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los datos. La normalidad se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk, la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene, y la independencia se asumió por el diseño

experimental. Todas las pruebas fueron realizadas en el software R.

El análisis de las emisiones de monóxido de carbono (CO), realizado mediante ANOVA y la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95%, reveló diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, proporcionando información clave sobre la combustión de residuos de madera en un quemador prototípico en la ciudad de Puerto Maldonado, Madre de Dios. El ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre los 14 tratamientos, con un valor de F calculado de 24,58, el cual supera ampliamente el valor crítico de F (0,00000502) al nivel de significancia del 5%.

La prueba de Tukey, aplicada para comparaciones post-hoc entre los tratamientos, confirmó con un 95% de confianza que las emisiones de CO varían significativamente entre ellos (Figura 5). El tratamiento 1 (cámara de combustión sin insuflado) presentó las emisiones más altas, mientras que el tratamiento 11 registró las más bajas. Asimismo, los tratamientos 7, 8, 10, 11 y 14 mostraron emisiones estadísticamente similares, lo que indica que cualquiera de estos tratamientos podría ser igualmente efectivo para reducir las emisiones de CO (Tabla 3). La Figura 5 ilustra estas diferencias y refleja la variabilidad observada en los datos experimentales.

Tabla 3. Prueba de Tukey para las medias de los tratamientos aplicados en el quemador prototípico para el CO.

Table 3. Tukey test for the means of the treatments applied in the prototype burner for CO.

Tratamientos	CO (ppm)
1	1534,034 ± 424,57 ^A
2	1401,666 ± 491,43 ^{AB}
6	977,930 ± 85,28 ^{ABC}
5	831,068 ± 303,93 ^{ABC}
4	750,214 ± 297,72 ^{BC}
12	749,716 ± 58,32 ^{BC}
3	719,378 ± 145,63 ^{591 BC}
13	715,858 ± 177,39 ^{594 BC}
9	712,448 ± 532,16 ^{BC}
10	669,432 ± 195,56 ^C
8	656,596 ± 125,10 ^C
14	636,762 ± 98,02 ^C
7	627,402 ± 49,90 ^C
11	603,302 ± 181,78 ^C

Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

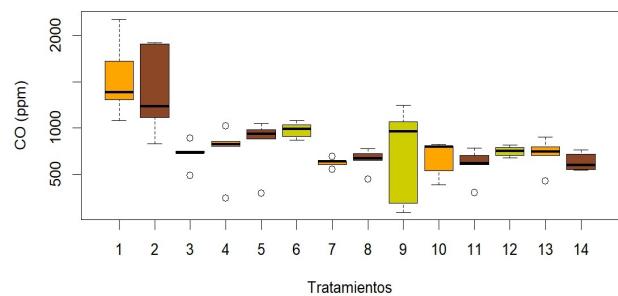


Figura 5. Variación de las emisiones de CO en los tratamientos del quemador prototípico.

Figure 5. Variation of CO emissions in prototype burner treatments.

Estos resultados destacan la importancia de seleccionar adecuadamente el tratamiento en función de los objetivos de reducción de emisiones. La variabilidad observada entre los tratamientos también sugiere que existen enfoques

alternativos viables para optimizar la combustión de los residuos de madera y minimizar la liberación de monóxido de carbono en la ciudad de Puerto Maldonado.

3.3. Emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

El análisis de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), realizado mediante ANOVA y la prueba de Tukey (Tabla 4), proporcionó resultados significativos que ofrecen una comprensión esencial sobre el comportamiento de la combustión de residuos de madera en un quemador prototípico en Puerto Maldonado, Madre de Dios. El ANOVA reveló diferencias altamente significativas entre los 14 tratamientos evaluados en términos de emisiones de CO₂, con un valor de F calculado de 24,58, que supera ampliamente el valor crítico de F (0,00000502) al nivel de significancia del 5%.

La prueba de Tukey, aplicada para comparar las medias entre los tratamientos, confirmó con un 95% de certeza que las emisiones de CO₂ varían significativamente entre ellos. El tratamiento 3 registró la mayor emisión, mientras que el tratamiento 9 presentó las más bajas. Además, los tratamientos 2, 4, 7, 8 y 12 mostraron emisiones estadísticamente similares, lo que indica que estas configuraciones podrían ser igualmente efectivas para la reducción de CO₂ (Figura 6). La Figura 6, ilustra la variabilidad de las emisiones de CO₂ en los 14 tratamientos, evidenciando diferencias significativas y la variabilidad inherente a las condiciones experimentales.

Tabla 4. Prueba de Tukey para las medias de los tratamientos aplicados en el quemador prototípico para el CO₂.

Table 4. Tukey test for the means of the treatments applied in the prototype burner for CO₂.

Tratamientos	CO ₂ (ppm)
3	8686,990 ± 1004,67 ^A
4	8193,032 ± 931,71 ^A
2	7164,610 ± 321,58 ^{AB}
12	6948,840 ± 1757,17 ^{AB}
8	6877,834 ± 1650,79 ^{AB}
7	6656,874 ± 842,9101 ^{AB}
6	6527,678 ± 1076,42 ^{AB}
14	6055,620 ± 1955,76 ^{AB}
5	5771,982 ± 2487,56 ^{AB}
10	5131,274 ± 1547,86 ^{AB}
11	4694,392 ± 1629,45 ^{AB}
13	4616,804 ± 2122,30 ^{AB}
1	3417,446 ± 1613,05 ^B
9	2588,880 ± 1332,64 ^B

Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

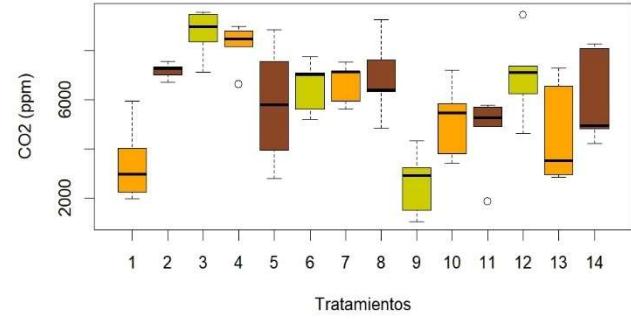


Figura 6. Variación de Emisiones de CO₂ en Tratamientos de Quemador Prototípico.

Figura 6. Variation of CO₂ emissions in prototype burner treatments.

Estos resultados subrayan la importancia de seleccionar las estrategias más apropiadas para optimizar la combustión de residuos de madera y reducir las emisiones de dióxido de carbono en la ciudad de Puerto Maldonado. La variabilidad observada entre los tratamientos también implica que es posible adoptar diferentes combinaciones para lograr la eficiencia deseada en la combustión, sin comprometer la reducción de CO₂.

3.3. Emisiones de temperatura

El análisis de las emisiones de temperatura, realizado mediante ANOVA y la prueba de Tukey, reveló hallazgos significativos que proporcionan una visión clave sobre el comportamiento de la combustión de residuos de madera en un quemador prototípico en Puerto Maldonado, Madre de Dios. El ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre los 14 tratamientos evaluados en términos de emisiones de temperatura, con un valor de F calculado de 40,32, que supera ampliamente el valor crítico de F (0,00000206) al nivel de significancia del 5% (Tabla 5).

La prueba de Tukey, aplicada para comparar las medias entre los tratamientos, confirmó con un 95% de certeza que las temperaturas varían significativamente entre ellos. El tratamiento 2 presentó la temperatura más elevada, mientras que el tratamiento 9 mostró la más baja (Figura 7). Además, los tratamientos 7, 8, 10, 11, 12 y 14 exhibieron temperaturas estadísticamente similares, lo que sugiere que estas configuraciones podrían ser igualmente efectivas en la regulación térmica durante la combustión. La Figura 7 ilustra la distribución de las temperaturas registradas en cada tratamiento, evidenciando el impacto de las distintas configuraciones del quemador en el proceso de combustión.

Estos resultados destacan la importancia de seleccionar las estrategias óptimas para controlar la temperatura en el proceso de combustión de residuos de madera. El control adecuado de la temperatura no solo contribuye a mejorar la eficiencia de la combustión, sino también a reducir las emisiones y, por ende, a minimizar el impacto ambiental en la ciudad de Puerto Maldonado.

Tabla. 5. Prueba de Tukey para las medias de los Tratamientos aplicados en el Quemador-Prototípico para la temperatura.

Table 5. Tukey Test for the means of the treatments applied in the prototype burner for temperature.

Tratamientos	Temperatura (°C)
2	456,254 ± 43,40 ^A
1	415,180 ± 65,72 ^{AB}
4	399,552 ± 32,26 ^{ABC}
3	361,928 ± 37,79 ^{ABC}
5	351,852 ± 18,04 ^{ABC}
6	329,336 ± 16,18 ^{ABC}
13	320,792 ± 26,59 ^{BC}
14	307,748 ± 10,16 ^{BCD}
11	300,876 ± 15,17 ^{BCD}
7	288,678 ± 17,74 ^{BCD}
10	285,492 ± 17,70 ^{BCD}
12	284,886 ± 12,61 ^{CD}
8	282,268 ± 9,13 ^{CD}
9	178,846 ± 79,74 ^D

Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

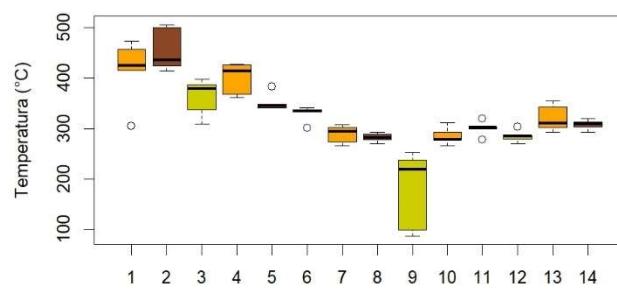


Figura 7. Variación de Emisiones de la temperatura en Tratamientos de Quemador Prototípico.

Figure 7. Variation of temperature emissions in prototype burner treatments.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio sobre las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y temperatura durante la combustión de residuos de madera en un quemador prototípico en Puerto Maldonado presentan importantes implicaciones tanto para la eficiencia de la combustión como para la reducción de emisiones contaminantes. Estos hallazgos se alinean con investigaciones previas, las cuales también han subrayado la relevancia de optimizar las condiciones del proceso de combustión para minimizar el impacto ambiental y mejorar el rendimiento energético.

Para identificar el tratamiento más adecuado en el uso del quemador prototípico, es fundamental evaluar conjuntamente los tres parámetros analizados: emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y temperatura de salida. Un enfoque integrado revela que, si bien algunos tratamientos presentan bajas emisiones de CO o CO₂ de manera individual, el tratamiento 11 se distingue por lograr un balance óptimo entre la reducción simultánea de ambos gases contaminantes y una temperatura de combustión adecuada para asegurar eficiencia térmica. Este tratamiento combina un insuflado controlado de aire en las cámaras de combustión y poscombustión, lo que favorece una combustión más completa y limpia. Por tanto, la selección de esta configuración no solo minimiza el impacto ambiental generado por las microempresas carpinteras, sino que también garantiza un proceso térmico efectivo para aplicaciones industriales como el secado de madera. De esta manera, se propone que el tratamiento 11 sea priorizado para futuras implementaciones y estudios a escala real en la región.

El presente estudio evaluó el efecto de tres parámetros importantes (CO, CO₂ y temperatura).

4.1. Similitudes con otros estudios sobre la combustión de biomasa

El estudio de Hodžić et al. (2023) analizó la combustión conjunta de lignito y biomasa leñosa, demostrando que la aplicación de aire segmentado (air staging) puede reducir las emisiones de NOx hasta en un 30%, sin afectar el comportamiento de las cenizas. Además, la introducción de gas natural como combustible terciario en procesos de recombustión permitió una reducción adicional de NOx y CO₂ proporcional al porcentaje de gas utilizado. Estos hallazgos son consistentes con nuestros resultados, que muestran una reducción significativa de emisiones mediante ajustes en el suministro de aire y la configuración del quemador prototípico, reafirmando la eficacia de estas

estrategias para optimizar la combustión de biomasa y minimizar la contaminación. De manera similar, Zhang et al. (2018) investigaron un sistema avanzado de control de la entrada de aire en chimeneas alimentadas con leña, demostrando que el control preciso del flujo de aire y la temperatura permite una reducción significativa de emisiones contaminantes, especialmente CO y partículas. Los autores observaron que el manejo adecuado del aire de combustión optimiza la eficiencia térmica y disminuye la formación de productos incompletos de combustión, resultados que coinciden con los nuestros, donde el tratamiento 11, con mejor regulación del aire, presentó menores emisiones de CO comparado con el tratamiento 1, que mostró las mayores emisiones por insuficiente control del aire.

4.2. Condiciones de combustión y su relación con las emisiones

El estudio de CHOÏNSKI et al. (2022) sobre las condiciones del proceso de combustión y la emisión de CO/CO₂ durante la quema de pellets de madera industrialmente certificados proporciona una perspectiva adicional. En su investigación, se concluyó que las condiciones operativas específicas afectan directamente la emisión de gases, lo cual está en línea con nuestros resultados, donde se evidenció que ciertos tratamientos, como el tratamiento 2, producen temperaturas significativamente más altas, lo que podría estar relacionado con una mayor liberación de CO₂.

Chojnacki et al. (2022) realizaron un estudio comparativo sobre la combustión catalítica de pellets elaborados a partir de residuos de tableros de muebles y madera mezclada con diferentes proporciones de Fe₂O₃ (0%, 5%, 10%, y 15%). Evaluaron cómo la adición de este catalizador afectaba las emisiones de gases contaminantes como NO_x, CO, y H₂, así como la calidad de la combustión en una caldera. Los resultados mostraron que el aumento del contenido de Fe₂O₃ en los pellets redujo significativamente las emisiones de NO_x, CO y H₂, con un efecto más marcado en los pellets hechos con residuos de tableros, que tienen mayor contenido de nitrógeno. Sin embargo, la calidad de la combustión no se vio afectada negativamente por la adición del catalizador, según la comparación entre las emisiones de CO₂ teóricas y experimentales y el análisis de las cenizas. Esto subraya que la incorporación de Fe₂O₃ puede mejorar la eficiencia ambiental de la combustión sin deteriorar su rendimiento. En nuestro estudio, de forma similar, observamos que el control del flujo de aire en la combustión contribuye a una reducción de emisiones de CO, lo cual es coherente con la importancia de optimizar las condiciones de combustión para minimizar la contaminación gaseosa.

4.3. Relación con estudios sobre combustión de biomasa y residuos

Un estudio relevante para la comparación es el de OLUWASANMI et al. (2023), quienes investigaron la combustión de aserrín de madera con diferente densidad térmica. Aunque su enfoque fue diferente, ambos estudios coinciden en que las propiedades físicas de la biomasa, como la densidad y el contenido de humedad, influyen significativamente en el rendimiento de la combustión y las emisiones contaminantes. En nuestro caso, los tratamientos que involucraron madera con diferentes características también mostraron variaciones en las emisiones de

temperatura y CO₂, lo que refuerza la importancia de conocer las propiedades de los residuos de madera a utilizar.

El trabajo de CARNEVALE et al. (2022) sobre la valorización de residuos agroindustriales mediante la combustión de astillas forestales subraya la importancia de controlar las emisiones de gases contaminantes durante la combustión de biomasa. Este estudio resalta el impacto ambiental de los gases generados, lo que se correlaciona con nuestros resultados sobre las emisiones de CO₂, donde se observó que los tratamientos con una mayor temperatura (como el tratamiento 2) generaron emisiones más altas de CO₂.

4.4. Reactividad de los materiales y su impacto en las emisiones

ALTUNKAYA et al. (2023) evaluaron las características de combustión de cinco tipos de residuos de madera, incluyendo madera de pino no tratada, madera tratada químicamente, marcos de ventanas de madera, parquet y muebles de MDF, mediante análisis termogravimétrico (TGA). Este análisis permitió determinar la reactividad de los materiales durante la combustión, es decir, cómo se degradan térmicamente bajo diferentes condiciones. Los resultados indicaron que los residuos de madera presentan una mayor reactividad en comparación con lignitos locales, lo que sugiere que su incorporación puede mejorar el rendimiento en sistemas termoquímicos.

En línea con estos hallazgos, en nuestro estudio observamos que los tratamientos que utilizaron materiales con mayor reactividad o configuraciones que favorecieron una combustión más rápida mostraron mayores emisiones de gases contaminantes, especialmente CO. Por ejemplo, los tratamientos con insuflado de aire en la cámara primaria presentaron emisiones más elevadas, posiblemente debido a una combustión menos controlada y más rápida. Esto subraya la importancia de seleccionar adecuadamente los residuos de madera y optimizar las condiciones de combustión para minimizar el impacto ambiental.

4.5. Influencia del contenido de oxígeno en las emisiones

Finalmente, el trabajo de KADIĆ et al. (2023), que investigó los efectos de los cambios en el contenido de oxígeno durante la combustión, proporciona información adicional sobre cómo la composición del oxidante afecta las emisiones de gases contaminantes. Aunque nuestro estudio no se centró específicamente en el contenido de oxígeno, los resultados de los tratamientos con diferentes configuraciones de aire sugieren que la cantidad de oxígeno disponible para la combustión también juega un papel crucial en las emisiones generadas. Las variaciones en las emisiones de CO y CO₂ pueden atribuirse en parte a la mezcla de aire en las diferentes cámaras del quemador prototípico.

5. CONCLUSIONES

Este estudio ha proporcionado una visión valiosa sobre la combustión de residuos de madera en la industria de la carpintería en Puerto Maldonado, Madre de Dios, Perú. La identificación de las especies de madera más utilizadas y el análisis detallado de las emisiones de CO, CO₂ y temperatura demostraron que es posible optimizar el proceso de combustión para reducir su impacto ambiental.

En particular, el tratamiento 11, que combinó un adecuado insuflado de aire y configuración en las cámaras de combustión y postcombustión, fue el más efectivo para disminuir simultáneamente las emisiones de CO, CO₂ y la temperatura, en comparación con otros tratamientos evaluados.

Estos resultados abren la puerta a prácticas más sostenibles en la industria maderera, que contribuirán tanto a la preservación de los recursos naturales en la región amazónica como a la implementación de procesos más responsables con el medio ambiente.

Este estudio no solo representa un avance en la gestión ambiental en la carpintería, sino que también invita a continuar explorando soluciones innovadoras que promuevan un equilibrio entre el desarrollo industrial y la conservación del ecosistema amazónico.

6. REFERENCIAS

- ALTUNKAYA, K. B.; CIVAN, M.; YURDAKUL, S., Determination of combustion characteristics of selected waste wood samples and two local lignites by thermogravimetric analysis. En: SOGUT, M. Z.; KARAKOC, T. H.; SECGIN, O.; DALKIRAN, A. (Eds.) International Symposium on Energy Management and Sustainability, 2022. **Proceedings...** Cham: Springer International Publishing, pp. 293-299. , 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30171-1_32
- ARAUJO, A.; PARADA, A.; TERÁN, J.; BAKER, T.; FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; BRIENEN, R. Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. **Revista Peruana de Biología**, v. 18, n. 1, p. 113- 118, 2011. <https://doi.org/10.15381/rpb.v18i1.155>
- ARQUIÑIGO, C. M.; DIAZ ENCINAS, A. I.; ARQUIÑIGO, N.M. Spatial planning of the timber industry and the social-environmental and economic impact in Pucallpa-ucayali (Peru), 2000-2019. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, v. 17, p. 583-594, 2021. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.56>
- CARNEVALE, M.; PARIS, E.; VINCENTI, B.; PALMA, A.; SALERNO, M.; GUERRERO, E.; MANCINI, R.; CALCOPIETRO, M.; GALLUCCI, F. Combustion and emission analysis of spent mushroom compost and forestry woodchip for management and energy production. **Fire**, v. 6, n. 1, e17, 2022. <https://doi.org/10.3390/fire6010009>
- CHOIŃSKI, B.; SZATYŁOWICZ, E.; ZGŁOBICKA, I.; YLIDIZ, M. J. A Critical investigation of certificated industrial wood pellet combustion: influence of process conditions on CO/CO₂ emission. **Energies**, v. 16, n. 1, e13, 2022. <https://doi.org/10.3390/en16010250>
- CHOJNACKI, J.; KIELAR, J.; KUCZYŃSKI, W.; NAJSER, T.; KUKIELKA, L.; FRANTÍK, J.; BERNER, B.; PEER, V.; KNUTEL, B.; GAZE, B. Analysis of the effect of Fe₂O₃ addition in the combustion of a wood-based fuel. **Materials**, v. 15, n. 21, e14, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15217740>
- DERNBECHER, A.; DIEGUEZ-ALONSO, A.; ORTWEIN, A.; TABET, F. Review on modelling approaches based on computational fluid dynamics for biomass combustion systems: focus on fixed bed and moving grate systems. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 9, n. 1, p. 129-182, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00370-z>
- DIEDERICHS, S. **Empowering woodworking industry stakeholders to reduce environmental impacts**. Hamburg: Universität Hamburg. 2015. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2bf2a88388b7c99fd4200b9acb90959a66f2f048>
- FOSTER, R.; PARKER, T.; GENTRY, A. (Orgs.). **The Tambopata-Candamo reserved zone of southeastern Perú: a biological assessment**. Washington, DC: Conservation International, Department of Conservation Biology, 1994. 192p. (RAP working papers, 6).
- GARCÍA-SÁNCHEZ, G.; CHACÓN-VELASCO, J.; FUENTES-DÍAZ, D.; JARAMILLO-IBARRA, J.; MARTÍNEZ-MORALES, J. CFD modelling of biomass boilers - a review of the state of the art. **Respuestas**, v. 25, n. 3, p.262-273, 2020. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2462>
- GAZE, B.; WOJTKO, P.; KNUTEL, B.; KOBEL, P.; BOBROWICZ, K.; BUKOWSKI, P.; CHOJNACKI, J.; KIELAR, J. Influence of catalytic additive application on the wood-based waste combustion process. **Energies**, v. 16, n. 4, e13, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16042055>
- HODŽIĆ, N.; KADIC, K. Co-firing of coal and woody biomass under conditions of reburning technology with natural gas. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 12, n. 3, p. 440-447, 2023. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.50250>
- KADIĆ, K.; HODŽIĆ, N. Flue gas emissions on the oxygen-enriched combustion of brown coal and woody biomass. En: KARABEGOVIC, I.; KOVAČEVIĆ, A.; MANDZUKA, S. (Eds.). **New Technologies, Development and Application VI**. Cham: Springer Nature Switzerland, v. 707. p. 95-103, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34721-4_11
- KOHNESHAHRI, M. H.; MOHAMMADYAN, M.; KHANI, M.; POURHOSSEIN, M.; DASTAKZAN, B. Designing a local exhaust ventilation system to control Toluene Diisocyanate and dust in woodworking industries. **International Journal of Occupational Hygiene**, v. 8, n. 4, p. 223-229, 2017.
- MICHALSKI, K.; GEMBALSKA-KWIECIEŃ, A.; MUSIOŁ, A.; OLEJÁROVÁ, Š. Impact study of a dust removal system on reduction of selected health hazards of employees in carpentry. **Multidisciplinary Aspects of Production Engineering**, v. 1, n. 1, p. 323-329, 2018. <https://doi.org/10.2478/mape-2018-0041>
- OLUWASANMI, I. A.; SURAJUDEEN, O. O. Thermogravimetric analysis of high- and low-density sawdust under nitrogen gas atmosphere. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 45, n. 3, p. 8703-8715, 2023. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2232746>
- OZGEN, S.; CERNUSCHI, S.; CASERINI, S. An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, e9, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110113>
- PORTAL-CAHUANA, L. A.; KOHAGURA-ARRUNÁTGUI, J. A. H.; FLORES, C. E. M.; FRÍAS-QUIÑONES, T. de M.; TOMAZELLO-FILHO, M. Wood anatomical structure and density of Tachigali aubl species occurring in the southeastern peruvian Amazon

- forest. Revista Floresta, v. 53, n. 2, p. 174-183, 2023. <https://doi.org/10.5380/rf.v53.i2.83247>
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** (Versión 4.4.3) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. 2025. <https://www.R-project.org/>
- TUCKI, K.; ORYNYCZ, O.; WASIAK, A.; ŚWIĆ, A.; MIESZKALSKI, L.; WICHŁACZ, J. Low emissions resulting from combustion of forest biomass in a small-scale heating device. **Energies**, v. 13, n. 20, e18, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13205495>
- VARINY, M.; VARGA, A.; RIMÁR, M.; JANOŠOVSKÝ, J.; KIZEK, J.; LUKÁČ, L.; JABLONSKÝ, G.; MIERKA, O. Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review. **Processes**, v. 9, n. 1, e34, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9010100>
- VON MÜHLEN BRANDALISE, I.; CÉSAR, P. M.; DE SOUZA RÊGO, C.C. Wood, management and dust: analysis of the Context of Production of Goods and Services (CPGS) of an academic woodwork. **Work**, v. 41, p. 5485-5487, 2012. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0860-5485>
- ZEPNER, L.; KARRASCH, P.; WIEMANN, F.; BERNARD, L. ClimateCharts.net – an interactive climate analysis web platform. **International Journal of Digital Earth**, v. 14, n. 3, p. 338-356, 2021. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1829112>
- ZHANG, X.; WANG, Y.-P.; PENG, S.; RAYNER, P. J.; CIAIS, P.; SILVER, J. D.; PIAO, S.; ZHU, Z.; LU, X.; ZHENG, X. Dominant regions and drivers of the variability of the global land carbon sink across timescales. **Global Change Biology**, v. 24, n. 9, p. 3954-3968, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14275>

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, por las facilidades en el uso sus laboratorios.

Contribuciones de los autores: J.N-Ch.: contribuyó a la concepción, el trabajo experimental, así como a la redacción, y leyó y aprobó el manuscrito. C.A.L-M.: contribuyó a la concepción, la metodología, y leyó y aprobó el manuscrito final. P.A. Z-P.: contribuyó a la concepción, la metodología, y leyó y aprobó el manuscrito. L.A.P-C.: interpretación de los datos analizados, así como a la redacción y revisión del manuscrito, y leyó y aprobó el manuscrito final.

Todos los autores leyeron el artículo en su versión final y aprobaron su publicación.

Financiación: No aplicable.

Disponibilidad de los datos: Los datos para esta investigación pueden obtenerse mediante solicitud al autor correspondiente vía correo electrónico.

Conflicto de intereses: El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.



Derechos de autor: © 2024 de los autores. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial (CC BY-NC) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).