

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Evaluación comparativa de modificaciones implementadas a un
nuevo prototipo de estufa mejorada, Justa 3D, mediante la prueba de
Ebullición de Agua

Estudiante

Luis Carlos Morazán Suárez

Asesores

Victoria Cortés Matamoros, D.C.A.

Anibal Osorto Pinel, Ing.

José Fernando Tercero, M.Sc.

Honduras, agosto 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA ALEJANDRA TENORIO MONCADA

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

A la Asociación Hondureña de Desarrollo (AHDESA) ya que fue la institución que estableció las bases para elaborar el diseño y acompañó el proceso de construcción del tercer desarrollo de la estufa mejorada Justa para Honduras.

Al Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM) Zamorano por facilitar el acceso a todo el equipo de Laboratorio para las evaluaciones de la línea base, las modificaciones incorporadas y el prototipo final de la estufa Justa 3D.

A la D.C.A. Victoria Cortés, al Ing. Anibal Osorto, al Ing. Jacob Vasques y al Ing. José Fernando Tercero, su conocimiento, experiencia, tiempo invertido y asesoramiento esclarecieron el panorama y proporcionaron elementos determinantes para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Finalmente, a Víctor Jimenez Trejo, técnico encargado del CEEM, por su colaboración y ayuda durante la fase experimental, tanto en la construcción de los prototipos como en la evaluación de los mismos.

Contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos.....	18
Alcances de la Investigación	18
Sitio de Estudio	18
Categorización de Línea Base y Prototipos Seleccionados Conforme a la Norma Nacional OHN 97001:2017	26
Evaluación del Consumo de Leña en los Prototipos Seleccionados	27
Relación entre Consumo de Leña y Emisiones Totales.....	27
Resultados y Discusión.....	29
Categorización de Línea Base y Prototipos Seleccionados Conforme a Norma OHN 97001:2017.....	29
Evaluación del Consumo de Leña en los Prototipos Seleccionados	40
Relación Entre Consumo Específico de Combustible y Emisiones Totales de los Modelos con Oxigenador.....	43
Conclusiones	47
Recomendaciones.....	48
Referencias.....	49
Anexos.....	53

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Resumen global de los prototipos y las variables modificadas	21
Cuadro 2 Clasificación de Estufas Mejoradas de acuerdo al Consumo de Energía (OHN, 2017)	26
Cuadro 3 Clasificación de las Estufas Mejoradas de acuerdo al Consumo de leña (OHN, 2017)	26
Cuadro 4 Clasificación de las Estufas Mejoradas de acuerdo a las Emisiones Totales Capturadas (OHN, 2017)	27
Cuadro 5 Resumen general de resultados obtenidos en la evaluación de prototipos	30
Cuadro 6 Resultados de los Parámetros Normalizados de la Estufa Justa 16x24, utilizada como línea base	31
Cuadro 7 Resultados de los Parámetros Normalizados de la Estufa Justa 3D	32

Índice de Figuras

Figura 1 Modelo estructural de la Estufa Justa 16×24	19
Figura 2 Modelo estructural de la estufa Justa 3D con ladrillo.....	22
Figura 3 Estructura interna del prototipo Justa 3D con las guías en su diseño	22
Figura 4 Temperatura durante las fases del WBT (CCA, 2014)	24
Figura 5 Consumo de leña de los prototipos Evaluados	33
Figura 6 Emisiones de CO de los modelos de estufas evaluados y los parámetros establecidos por la Norma OHN 97001:2017.....	35
Figura 8 Consumo de Energía de los modelos evaluados y los parámetros de clasificación establecidos por la Norma OHN 97001:2017	38
Figura 9 Distribución del calor en la plancha durante la fase de fuego.....	39
Figura 10 Tiempo de ebullición de los prototipos evaluados	40
Figura 11 Diferencia en el Consumo de leña de los prototipos evaluados.....	40

Índice de Anexos

Anexo A Emisiones de partículas, temperatura de la olla y humedad relativa durante el WBT	53
Anexo B Distribución del calor en la plancha de los modelos evaluados	54
Anexo C Monitoreo térmico de los modelos evaluados	57
Anexo D Filtros de las tres evaluaciones WBT de la estufa Justa 3D	60
Anexo E Emisiones totales y consumo de leña de los modelos con oxigenador	61

Resumen

En Honduras, 29% de población urbana y 88% de población rural utilizan leña para cocinar alimentos. El uso de este recurso conlleva a implicaciones nacionales y globales relacionadas al incremento de la deforestación, emisiones atmosféricas y calidad del aire en hogares. La tecnología de cocción utilizada contribuye a esta problemática, ya que en estufas ineficientes la combustión es incompleta, la transferencia de calor inadecuada, mayor consumo de leña y generación de emisiones. Para proporcionar alternativas enfocadas en desarrollar tecnologías apropiadas que mitiguen los impactos previstos, esta investigación evaluó el desempeño de la estufa Justa 16 × 24, utilizando su diseño como línea base para desarrollar un prototipo con mayor eficiencia energética. Para esto se modificó la cámara de combustión, el área de conducción de la llama y de emisiones hacia la chimenea. Partiendo de resultados preliminares de estas variantes, se modificó la plancha de cocción y el área para evacuar emisiones hasta obtener el prototipo Justa 3D. A través del protocolo de ebullición de agua, se evaluó el desempeño energético asociado al consumo de leña y las emisiones totales de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM_{2.5}). Los resultados indican que, de acuerdo a la Normativa OHN 97001:2017 la Estufa Justa 3D se encuentra en Categoría A para las variables de consumo de leña y energía entregada. Aunque se identifican tendencias de asociación, a partir de los resultados obtenidos no se puede establecer una correlación entre la generación de emisiones de CO y PM_{2.5} y el consumo de leña.

Palabras clave: Combustión, eficiencia energética, emisiones, leña.

Abstract

In Honduras, 29% of the urban population and 88% of the rural population use firewood to cook food. The use of this resource leads to national and global implications related to deforestation, climate change and air quality within homes. The cooking technology contributes to this problem, since when using inefficient stoves the combustion is incomplete, the heat transfer is inadequate, firewood consumption and emissions generation increases. To provide alternatives by developing appropriate technologies focused on mitigation, the performance of the Justa 16 × 24 stove was evaluated in this research, using its design as a baseline to develop a prototype with improved energy efficiency. For this, modifications on the combustion chamber, the flame conduction area and the outlet to evacuate emissions to chimney were performed. In addition, starting from preliminary results of these variants, the griddle and the area to evacuate emissions were later modified to obtain the Justa 3D prototype. Through the water boiling test, the energy performance associated with firewood consumption and the total emissions of CO and PM_{2.5} were analyzed. The results indicate that according to the national standard OHN 97001: 2017, the Justa 3D Stove is in Category A for the variables of firewood consumption and energy delivered. Also, it was determined that there is an inverse relationship between firewood consumption and CO emissions, rather than results obtained for PM_{2.5} emissions where a positive relationship of 63% was found for models operated with oxygenator.

Keywords: combustion, emissions, energy efficiency, firewood.

Introducción

La energía representa un recurso indispensable para garantizar el desarrollo económico, la seguridad alimentaria y el bienestar social, sin embargo, a la vez representa el factor que contribuye en aproximadamente 60% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. El acceso a este recurso a través de fuentes no contaminantes representa una oportunidad para estimular el desarrollo, manteniendo la integridad de los recursos naturales y su disponibilidad para futuras generaciones (Energía Sin Fronteras [EsF], 2012). Esto constituye una ruta para contribuir al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, el cual contempla el acceso a fuentes energéticas asequibles y no contaminantes. Para alcanzar este ODS, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2021) indica que es necesario invertir en fuentes de energía limpia y mejorar la productividad energética. Por otra parte, la cocción de alimentos representa una actividad fundamental para garantizar el bienestar, seguridad alimentaria y salud de la población. En este contexto, la innovación de tecnologías de cocción debe enfocarse en mejorar el diseño para incrementar su eficiencia y facilitar el acceso a energía limpia con bajas emisiones de carbono.

Considerando que la cobertura forestal en Honduras constituye aproximadamente el 47.9% del territorio, el Anuario Forestal del 2018 ha identificado diferentes presiones socioambientales que afectan la disponibilidad de este recurso a largo plazo. Se reporta que el promedio de pérdida de bosques corresponde a 23,303 ha/año frente a una ganancia de 2,352.94 ha/año por medio de plantaciones forestales y regeneración ecológica del bosque. De acuerdo con la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística (INE), el uso de leña participa entre los factores que fomentan la deforestación, en donde el sector doméstico demanda aproximadamente 7.5 millones de m³ de este recurso al año lo que implica una situación en donde se compromete la sostenibilidad de este recurso (INE, 2018; Instituto de Conservación Forestal [ICF], 2019).

De acuerdo con el Banco Mundial (2021b), al 2019 la población en Honduras era de aproximadamente 9,746,000 habitantes, caracterizados porque el 42.27% pertenece al sector rural

(Banco Mundial, 2021a). Por otra parte, en áreas urbanas y periurbanas de Honduras el 29% de los hogares utiliza leña y en las zonas rurales el 88% de los hogares también utiliza este recurso como principal fuente de energía para la cocción de alimentos (Flores et al., 2019). De acuerdo con el informe del Balance Energético Nacional (BEN), la leña constituye el 61% de la oferta de energía primaria. En cuanto al consumo nacional de energía, el 40% corresponde al sector residencial, y a su vez, el 85% de la demanda residencial se suple mediante leña (Secretaría de Estado en el Despacho de Energía, 2018). La biomasa en Honduras es un recurso utilizado como fuente de energía en los hogares por su disponibilidad, bajo costo y fácil acceso (Baets, 2018).

Al identificar la cocción de alimentos en los hogares como una actividad relevante en la dinámica energética y forestal de Honduras, la tecnología utilizada para este fin puede contribuir al incremento o reducción del consumo de leña. Normalmente, el aprovechamiento térmico de la leña se efectúa mediante el uso de fogones abiertos o estufas tradicionales con eficiencias entre el 5 - 15% (Aristizábal Hernández, 2014; Mobarak et al., 2012). Se ha demostrado que el consumo promedio en hogares de cinco integrantes es de 10.87 kg/día de leña utilizando fogones convencionales, y que las emisiones asociadas a esta tecnología ascienden a 7 t CO₂e al año (Ludeña et al., 2015).

Con relación a los impactos ambientales, la combustión ineficiente de la leña no sólo es responsable de generar dióxido de carbono (CO₂), sino también otros gases y contaminantes como el monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), diferentes óxidos de nitrógeno (NO_x) y Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) que contribuyen a la degradación de los medios naturales (Aristizábal Hernández, 2014; Ramírez Quirama y Taborda Vergara, 2014). Como ya se mencionó, el alto consumo de leña por uso de tecnologías ineficientes ocasiona repercusiones y degradación en la cobertura forestal, esto, a su vez, afecta la biodiversidad, ciclos hidrológicos, uso y cobertura de suelo. Consecuentemente los suelos quedan desprotegidos y son susceptibles a la erosión eólica e hídrica (Aristizábal Hernández, 2014). Esto muestra que el alcance actual y la evolución futura del consumo de leña es un problema

que comprometerá el alcance de un desarrollo sostenible y que debemos mitigar con acciones concretas (Bailis et al., 2015).

Además de los aspectos ocasionados en el medio ambiente, el uso de fogones abiertos genera impactos negativos en la salud de las personas. La exposición crónica a las emisiones derivadas de la combustión de biomasa se relaciona con problemas de salud de tipo respiratorio como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), neumonía, asma y diversos tipos de morbilidad oftalmológica (World Health Organization [WHO], 2006). La Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2007, indica que, cocinar en fogones abiertos es una actividad peligrosa, pues la contaminación del aire en interiores es uno de los 10 principales riesgos mundiales de la salud. Se ha demostrado que el humo en la cocina ha sido el responsable de 1.6 millones de defunciones y 2.7% de la carga mundial de morbilidad (OMS, 2007).

Por otra parte, el costo de recolectar o comprar leña también tiene un gran impacto sobre la economía y el bienestar social de las familias. Los hogares que utilizan estufas tradicionales ubicados en zonas donde no se facilita su recolección y fácil acceso, pueden gastar alrededor de USD 20.00 mensuales por el costo de adquirir este recurso. Para el caso de las familias que pueden recolectar leña, se debe considerar el costo de viaje y tiempo invertido para esta actividad (Flores et al., 2019). Esta condición compromete los recursos económicos en el hogar y la disponibilidad de tiempo para ejecutar actividades que generen valor y contribuyan al desarrollo local. La combinación de estos factores señala los múltiples desafíos que impiden un desarrollo sostenible a nivel nacional (V. Cortés et al., 2020).

Actualmente, se están haciendo esfuerzos concentrados en el desarrollo y aplicación de tecnologías de cocción mejoradas que permitan sustituir los sistemas tradicionales y mejorar los procesos de combustión de la leña. Para abordar esta temática se cuenta con esfuerzos a nivel nacional de instituciones gubernamentales, privadas, diversas Organizaciones No Gubernamentales (ONG) y cooperación internacional, enfocados en la disseminación de estufas mejoradas. A la fecha, de

acuerdo al documento de la Estrategia Nacional de Adopción de Estufas Mejoradas (ENAEM) se estima que en Honduras se han distribuido aproximadamente 500,000 estufas mejoradas (V. Cortés et al., 2020).

Las estufas mejoradas son una tecnología desarrollada para abordar impactos adversos a la salud y los medios de vida (Lewis y Pattanayak, 2012). Su diseño hace posible que la eficiencia general sea comparativamente superior al de una estufa tradicional. Esta tecnología incrementa la eficiencia energética mediante la incorporación de una cámara de combustión, aislamiento térmico, áreas para conducir la llama, una chimenea para evacuar el humo y un componente que facilita la oxigenación durante la combustión. Este diseño conduce a un proceso de ignición más eficiente, en donde se reduce el consumo de leña, las emisiones totales e intramuros (Bryden et al., 2006). Al aumentar la eficiencia, existe un mejor aprovechamiento del combustible y reducción de las emisiones dañinas para la salud. De acuerdo con el estudio realizado por Aristizábal Hernández (2010), las estufas mejoradas son una tecnología con el potencial de reducir 0.86 toneladas al año/estufa de madera forestal.

La Norma Hondureña de Estufas Mejoradas OHN 97001:2017 define la estufa mejorada como una tecnología que “ha demostrado superar la línea base con respecto a los criterios principales que podrían incluir factores de: emisiones totales capturadas, emisiones intradomiciliarias, consumo de combustible, consumo energético y/o seguridad”. Esta Norma categoriza los modelos de las estufas acorde a su desempeño y/o seguridad. En términos del desempeño los parámetros evaluados son las emisiones totales e intradomiciliarias de CO y PM_{2.5}. Adicionalmente, se evalúa el consumo de leña y energía entregada. Cada parámetro tiene valores permisibles que permiten categorizar los diferentes modelos como: estufa no mejorada, estufa mejorada categoría B y estufa mejorada categoría A (Organismo Hondureño de Normalización [OHN], 2017).

En América Central se ha visto un significativo enfoque en el campo de innovación de estufas mejoradas. El primer modelo que se desarrolló fue en 1970, conocido como Lorena, creado en

Guatemala y su diseño contemplaba una estructura fija construida con materiales como lodo y arena, que incorporaba la plancha y la chimenea. La chimenea fue la primer mejora registrada en los fogones abiertos, lo cual contribuyó a reducir la contaminación intramuros (Granderson et al., 2009). En 1980, Honduras tuvo acceso a estufas que incorporaban la chimenea en su diseño, aunque fueran estufas ineficientes. A fines de 1990, se trabajó en un modelo local que adaptó el diseño de la estufa Lorena añadiendo una cámara de combustión con dimensiones específicas denominada “Rocket” por su inventor el Dr. Larry Winiarski, ya que, de acuerdo al autor, la salida de la llama y el sonido que produce al quemar la leña era parecida al escape de las llamas de propulsión de un cohete espacial. Esta modificación hizo posible la innovación en el sector de estufas de Honduras. Este nuevo prototipo incorporó mejoras adicionales como el material aislante que rodeó la cámara de combustión, una plancha metálica lisa como superficie de cocción y el deshollinador. Este modelo se llamó Justa en honor a la persona que colaboró con las pruebas de cocción (Wang et al., 2012).

Las tecnologías de cocción mejoradas distribuidas a nivel nacional se encuentran en su mayoría asociadas con el diseño de la estufa Justa. De acuerdo a la Alianza Global de Cocción Limpia (Clean Cooking Alliance, 2021), los modelos que tienen cámara de combustión tipo “rocket” mejoran la ignición de los gases y el humo dentro de la estufa. Estos diseños incorporan elementos para mejorar la transferencia de calor y la dirección del flujo de gases calientes a la olla o plancha mediante el aislamiento y canales estrechos.

El primer modelo con cámara de combustión “rocket” desarrollado e implementado en Honduras fue con la estufa Justa 22 × 22. La primera modificación de este modelo consistió en el cambio de las dimensiones de la plancha, tomando el nombre de Justa 16 × 24 por el tamaño de este componente. Esta variación representó una reducción del 33% en los costos de construcción y optimización de los materiales requeridos para esta actividad. Actualmente, el diseño de la estufa Justa 16 × 24 es impulsado por la Asociación Hondureña para el Desarrollo (AHDESA) para la implementación de proyectos de esta índole (Osorto Pinel, s. f.). De acuerdo con estudios realizados

en campo, este modelo tiene una vida útil de 3 a 10 años, dependiendo del uso y mantenimiento, con un costo aproximado de USD 150.00 (The Pan American Health Organization [PAHO], 2016).

Aunque el diseño de la estufa Justa 16 × 24 proporciona evidencia sobre la reducción de consumo de leña, emisiones totales e intradomiciliarias, la eficiencia energética alcanzada con el diseño actual no ha permitido obtener las metas en reducción de consumo de combustible. Lo anterior representa una oportunidad para proponer mejoras al diseño y alternativas para la innovación a través de prototipos que optimicen el desempeño de los modelos que actualmente se encuentran disponibles en el mercado.

El diseño de un nuevo modelo requiere de modificaciones que aumenten la eficiencia del proceso de combustión en la cocción de alimentos. Para ello, es importante entender la reacción de combustión y transferencia de calor a la plancha. De acuerdo con la investigación realizada por Torres y colaboradores (2012), la combustión es un fenómeno de oxidación en el que tienen lugar diferentes reacciones químicas donde se libera energía que contribuye a un aumento de la temperatura de los gases generados y el entorno en el que ella se produce. La primera fase de la combustión se denomina pirólisis, donde el combustible se calienta y sus componentes volátiles son liberados a la atmósfera. La segunda fase se caracteriza porque los gases pirolizados a altas temperaturas, se combinan con el oxígeno e inician las reacciones exotérmicas de oxidación. Es en esta etapa, donde se constituye el proceso de combustión propiamente dicho, generando CO₂ y energía calorífica como resultado de la ruptura de enlaces en los compuestos orgánicos presentes en la biomasa (Romero Salvador, 2010).

El hecho de que la combustión sea perfecta es esencial para el comportamiento de las tecnologías de combustión (Castells, 2005), ya que para fines de cocción de alimentos, hasta un fogón tradicional puede alcanzar un 90% de eficacia a la hora de convertir madera a calor, sin embargo, sólo una pequeña fracción de esa energía (entre 10 – 40%) llega a la olla. Mejorar la eficiencia en el proceso de combustión no consiste solamente en consumir menos leña, sino que debe considerar la reducción del humo y las emisiones dañinas que perjudican la salud. Por otra parte, la mejora en la eficiencia del

intercambio térmico sí puede favorecer la reducción del uso de combustible. Para poder disminuir las emisiones y el uso de leña, el diseño de una estufa se enfoca principalmente en que el fuego queme de forma eficiente el combustible y luego, que la mayor cantidad posible de calor pase a la olla o la plancha. Ambas funciones se pueden realizar en el diseño de un fogón bien concebido (Bryden et al., 2006).

En la investigación de Bryden y colaboradores (2006), se plantean 10 principios de diseño para la construcción de estufas mejoradas. Estos principios combinan la combustión limpia y completa junto con la optimización del intercambio térmico. Como punto de partida, el diseño de una estufa mejorada debe considerar las condiciones locales de cada región, tomando en cuenta tradiciones culinarias, materiales de construcción disponibles y manteniendo a la vez un diseño que facilite su adopción. Por otra parte, las variables de diseño consideradas en las estufas eficientes son el aislamiento del fuego, un ducto corto y aislado por encima del lecho de ignición, una estructura que permita calentar y quemar los leños a medida que ingresen al fuego, la generación de temperaturas altas y bajas según la cantidad de leña que se introduce, el mantenimiento de una corriente de aire continua y rápida en el proceso de combustión, la disminución en la producción de humo y exceso de carbón mediante una corriente de aire en el fuego.

Además, el área de los espacios dentro de la estufa por donde circulan los gases calientes y la chimenea externa deben ser consistentes en tamaño. Se debe utilizar una reja debajo del fuego que permita el paso de aire por debajo de la leña que se quema y finalmente, se debe aislar la trayectoria del aire caliente, utilizando materiales aislantes que mantengan la temperatura de los gases de combustión y favorezca el intercambio térmico de la olla con espacios adecuados.

Un nuevo prototipo debería estar enfocado en incrementar la eficiencia térmica y reducir el consumo de leña, las emisiones totales y la concentración de gases contaminantes. En términos de los requisitos planteados en la Norma OHN 97001:2017, se espera que un nuevo prototipo alcance la categoría A para las variables analizadas. En esta investigación se ha evaluado el efecto de las

modificaciones incorporadas al modelo Justa 16 × 24, hasta obtener un prototipo de estufa llamado Justa 3D, por ser el tercer desarrollo de estufas Justa. En este contexto, se plantean los siguientes objetivos: Verificar el cumplimiento de la Normativa Nacional de Estufas Mejoradas OHN 97001:2017 para el modelo Justa 3D, comparar el consumo específico de combustible de las diferentes modificaciones incorporadas al modelo Justa 16 × 24 y determinar la relación existente entre consumo de leña y emisiones totales de CO y PM_{2.5} de los modelos operados con el oxigenador.

Materiales y Métodos

Alcances de la Investigación

Esta investigación experimental es descriptiva ya que a través de protocolos de ensayo se busca evaluar las modificaciones realizadas al modelo de estufa Justa 16x24 para la obtención del prototipo Justa 3D y su categorización conforme a la normativa nacional OHN 97001:2017. Además, contempla un alcance correlacional ya que determina la dependencia de las emisiones totales sobre el consumo de leña. Por último, el análisis del efecto por las modificaciones incorporadas sobre los factores de desempeño de las estufas mejoradas, proporciona un alcance explicativo mediante la comparación de los resultados obtenidos (Ramos-Galarza, 2020).

Sitio de Estudio

Las modificaciones incorporadas de forma paulatina para la obtención del prototipo Justa 3D, fueron desarrolladas conforme al diseño proporcionado por AHDESA. La evaluación de las diferentes fases del diseño y el prototipo final se realizó en el Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM) de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano aplicando el protocolo de ebullición de agua. Conforme a lo descrito por la Alianza Global de Cocción Limpia (CCA por sus siglas en inglés), este procedimiento tiene la finalidad de medir la eficiencia de la estufa en la utilización de combustible para llevar a ebullición 5 L de agua. Aunado a esto, la prueba de ebullición también mide la cantidad de emisiones que se generan durante el proceso de cocción (Clean Cooking Alliance, 2021).

La ubicación geográfica del CEEM es 14°00'25"N y 87°00'51"W con una altitud aproximada de 800 msnm. El punto de ebullición del agua para las evaluaciones fue de 96.2 °C. Considerar la altitud es importante porque este es un parámetro estadísticamente significativo en la evaluación del desempeño de las estufas ya que la presión atmosférica influye sobre la temperatura de ebullición. Si la presión es menor, las moléculas pueden moverse y desplazarse con más facilidad y como consecuencia, la temperatura de ebullición disminuye. Lo contrario ocurre, cuando aumenta la presión (Pérez Bayer et al., 2013).

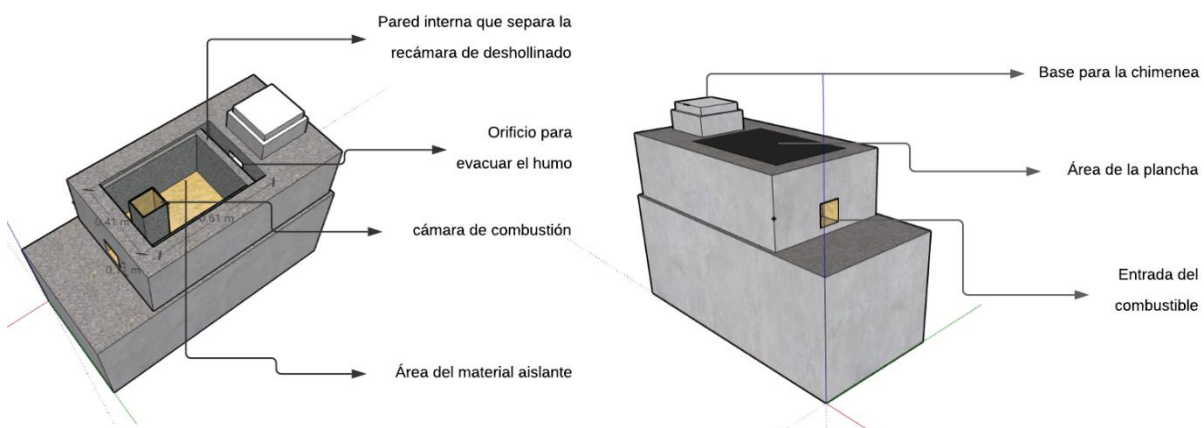
Línea Base y Prototipos Desarrollados

La estufa Justa 16 × 24 fue modelo utilizado como línea base para esta investigación, su diseño fue desarrollado por AHDESA, también es promovido por otras organizaciones a nivel nacional. La Figura 1 muestra una ilustración de este modelo, con una estructura que incorpora la cámara de combustión tipo “rocket” en donde se quema la leña de manera controlada. La altura y longitud de este componente es de 11 pulgadas y el área para la entrada de la leña es de 4.5 × 4.5 pulgadas. Su estructura incluye una pared interna que separa la recámara de deshollinado y tiene un orificio que evacua el humo proveniente de la cámara de combustión con trayectoria hacia la chimenea. El área del orificio para evacuar el humo es de 12 pulgadas cuadradas (4 de largo, 3 de alto). Este orificio se ubica en el centro de la pared de la recámara de deshollinado. El espacio en esta recámara es de 5 pulgadas en donde se coloca el deshollinador que permite la limpieza de la chimenea.

El área para colocar la plancha es de 16 pulgadas de ancho por 24 pulgadas de largo. En esta área se encuentra la cámara de combustión rodeada de ceniza que funciona como un material aislante para evitar pérdidas de calor. La plancha metálica de este modelo tiene un calibre de 1/8 de pulgada en grosor, reforzado con dos piezas de lámina del mismo calibre para soportar la temperatura alcanzada durante su operación, también tiene un tubo industrial de una pulgada en los bordes.

Figura 1

Modelo Estructural de la Estufa Justa 16 × 24



Las modificaciones hechas en la estufa Justa 16 × 24 para el desarrollo del nuevo prototipo están enfocadas en tres áreas de diseño: la cámara de combustión, la salida de gases a la chimenea y la plancha. En la cámara de combustión, se redujo la altura de la pared posterior en 1.2 pulgadas y se colocaron dos guías de cerámica sobre las cenizas para dirigir la llama del centro a las orillas de la plancha, esto con el fin de lograr una mejor dispersión de los gases calientes y las emisiones en el interior de la estufa. Se aumentó el área de salida de los gases hacia la chimenea distribuyendo el espacio en dos orificios ubicados en las zonas laterales de la pared de deshollinador. Cada orificio contó con 3.5 pulgadas de largo y 3 pulgadas de ancho, obteniendo un área de salida de 21 pulgadas cuadradas, 57% superior al modelo de referencia. Sin embargo, para la evaluación del prototipo final, el área de salida fue de 15 pulgadas, se redujo en un 28% considerando que el tamaño de la cámara por donde pasan los gases calientes y el área de la chimenea externa no eran consistentes en tamaño haciendo que el intercambio gaseoso sea rápido y el consumo de leña aumente en aproximadamente un 12%.

Los cambios hechos en la plancha se enfocaron en reducir el grosor y la masa de este componente; para esto se retiraron los refuerzos metálicos ubicados en la parte inferior con el objetivo de facilitar la transferencia de calor. También, se reemplazó el tubo industrial de la base por platina. Finalmente, algunas de las modificaciones preliminares consistieron en la instalación de un ladrillo al frente de la cámara de combustión a dos pulgadas de distancia, con la finalidad de mantener un ángulo en la leña que favoreciera la circulación del aire durante el proceso de combustión. Las evaluaciones de los prototipos se hicieron incorporando el oxigenador y también se hicieron pruebas sin este componente.

El oxigenador es una pieza de cerámica que facilita el ingreso del aire durante el proceso de combustión. La presencia de oxígeno en proporciones adecuadas contribuye a la eficiencia del proceso y reducción de la concentración de contaminantes como el CO. Aunque este componente forma parte integral del diseño de la estufa, se realizaron evaluaciones sin oxigenador debido a que una vez que

se construyen las estufas, las personas usuarias suelen desechar este componente al no entender su impacto sobre el desempeño de estas. Por esa razón, se evaluó la posibilidad de prescindir de esta pieza para reducir los costos y simplificar el diseño.

En la Figura 2, se muestra el primer prototipo que se evaluó, el cual fue llamado Justa 3D CL, en este prototipo se modificó la cámara de combustión, se colocaron las guías sobre la ceniza, se cambió el área de los orificios de salida ubicando uno en cada extremo (Figura 3). Además, se colocó el ladrillo frente a la cámara de combustión y se mantuvo la plancha usada en la estufa Justa 16 × 24. El segundo prototipo, llamado Justa 3D SL, fue evaluado con las modificaciones mencionadas anteriormente, pero retirando el ladrillo ubicado frente a la cámara de combustión. El último prototipo se llamó Justa 3D, en donde se mantuvieron los mismos diseños mencionados anteriormente, a excepción del área total de los orificios de salida y plancha. En el Cuadro 1, se presenta un resumen global en donde se asocia la variante para cada prototipo.

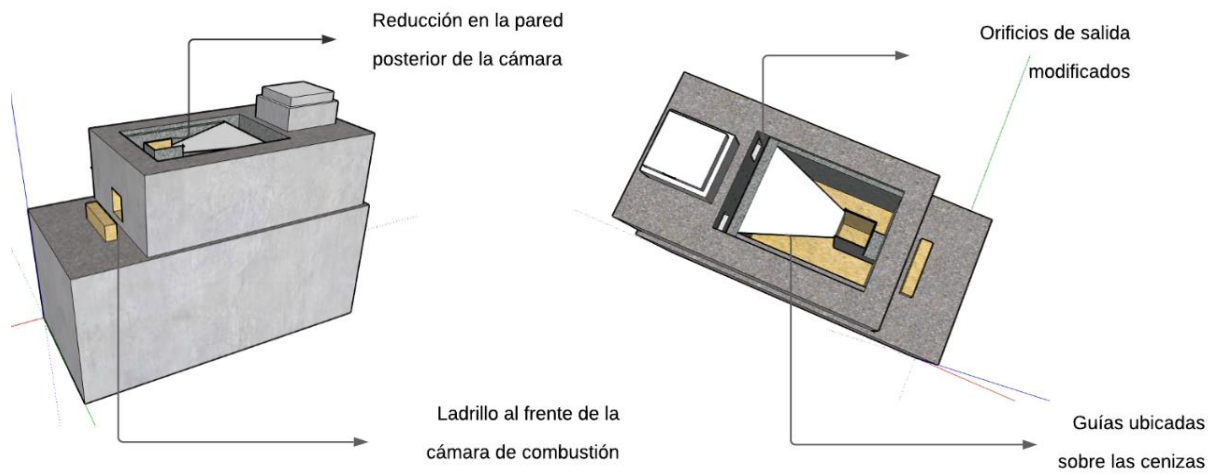
Cuadro 1

Resumen Global de los Prototipos y las Variables Modificadas

Prototipo	Cámara de combustión	Salida de gases a chimenea	Plancha	Características adicionales
Justa 16 x 24	Rocket 4.5 × 4.5 pulgadas Sin reducción en pared posterior.	Ubicada al centro de la pared del deshollinador. Área: 4 × 3 pulgadas	Calibre de 1/8, reforzada con piezas del mismo calibre. Con tubo industrial en bordes.	Se evaluó incorporando el oxigenador y también sin este componente.
Justa 3D CL	Rocket 4.5" × 4.5" Reducción en pared posterior de 1.2 pulgadas. Con ladrillo.	Salida bilateral Área de cada salida: 3.5" × 3"	16×24 – Línea base	Operada con oxigenador y también sin este componente. Se colocaron las guías
Justa 3D SL	Rocket 4.5 × 4.5 pulgadas. Con reducción en pared posterior de 1.2 pulgadas. Sin ladrillo.	Salida bilateral Área de cada salida: 3.5" × 3"	16×24 – Línea base	Operada con oxigenador y también sin este componente. Se colocaron las guías.
Justa 3D	Rocket 4.5 × 4.5 pulgadas. Con reducción en pared posterior de 1.2 pulgadas.	Salida bilateral Se redujo el área en 28%. Orificios de 2.5 × 3 pulgadas	Sin las piezas de reforzamiento y con platina en los bordes.	Evaluada solamente con oxigenador

Figura 2

Modelo Estructural de la Estufa Justa 3D con ladrillo

**Figura 3**

Estructura Interna del Prototipo Justa 3D con las guías en su diseño



Evaluación de Desempeño de Estufas Mediante la Prueba de Ebullición de Agua

La prueba de ebullición de agua (WBT por sus siglas en inglés) es un protocolo que se desarrolló para evaluar el desempeño de tecnologías de cocción bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos muestran información sobre la eficiencia térmica, consumo de leña, emisiones (CO, CO₂ PM_{2.5}), energía transferida y tiempo requerido para el alcance del punto de ebullición en 5 L de agua.

El combustible que se utilizó para las evaluaciones fue madera de pino (*Pinus oocarpa*). Las dimensiones de las piezas de leña fueron de 1.5 × 2.5 × 40 cm. El porcentaje de humedad en la leña para las evaluaciones no debe superar al 12%. Es importante que tanto la forma, tamaño y contenido de humedad del combustible se mantengan constantes durante todas las evaluaciones con el fin de aislar efectos en el desempeño de las estufas. Además de esto, es importante vigilar que la madera utilizada no contenga nudos ni resina, ya que estos componentes en la leña pueden ser un factor de alteración en los resultados de las evaluaciones, particularmente en las emisiones generadas.

Para el desarrollo del protocolo WBT se usaron ollas de Mylar (Tereftalato de polietileno, PET), que consiste en una película clara, flexible y traslúcida que en su estado natural es una resina incolora semi-cristalina. Este material facilita la transferencia de calor por conducción, ya que se adhiere a la superficie de la plancha. El diseño de las ollas debe utilizar el 60% del área total de la superficie de cocción. Para los modelos de estufas que se evaluaron, el área (en pulgadas) se distribuyó en dos ollas de 12 de ancho, 9.6 de largo y 6.65 de alto para una plancha con una superficie de 16 × 24.

De acuerdo al ensayo del protocolo publicado por la Alianza Global para Cocción Limpia (Clean Cooking Alliance, 2014), el proceso consta de tres fases. La primera fase se conoce como fase de alta potencia de inicio en frío, donde, la estufa se encuentra a temperatura ambiente y se usa combustible que ha sido previamente pesado. Se colocan 5 kg de agua en las dos ollas de mylar para llevar el contenido a ebullición. Cuando la olla 1 llega al punto de ebullición se debe pesar el agua hervida y reemplazarla por agua a temperatura ambiente para realizar la segunda fase identificada como fase

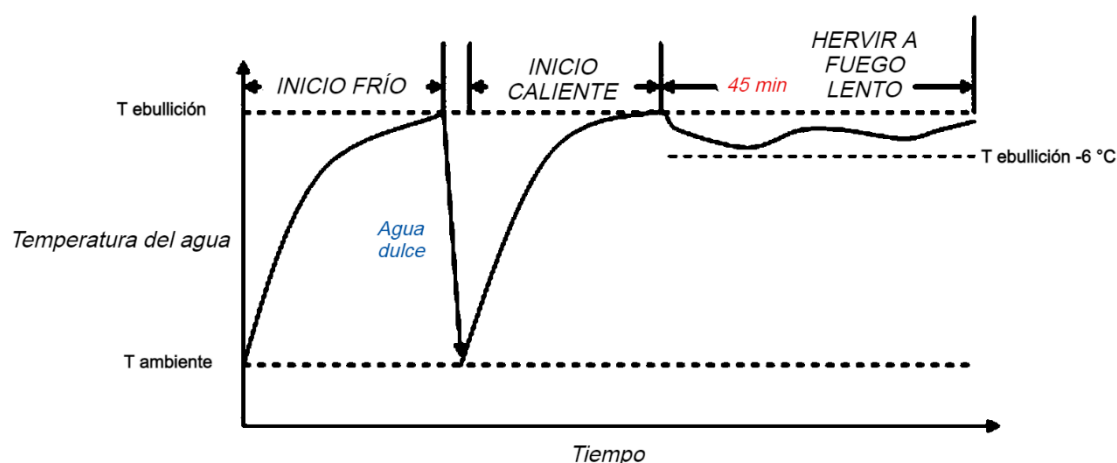
de alta potencia de inicio caliente. También, se debe pesar el combustible para registrar el consumo, así como los leños quemados y el peso de la ceniza. Para registrar la información se debe utilizar el Formulario de datos del Protocolo WBT que utiliza el CEEM.

Al repetir la prueba con la estufa caliente se pueden identificar las diferencias en el rendimiento existente en una estufa cuando esta inicia el proceso de combustión en frío y cuándo está caliente. Después que el agua de la olla 1 llega al punto de ebullición se registra el peso del agua de cada olla, la temperatura, el peso de la leña y el peso de las piezas de madera quemadas. Finalmente, la última fase consiste en hervir a fuego lento y esta proporciona la cantidad de combustible requerido para mantener el agua de las ollas en un rango mínimo de 3 °C por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos después de concluir con la segunda fase.

La evaluación completa de la estufa debe incluir las tres fases del protocolo. Este ensayo se realizó al menos tres veces para cada estufa verificando que el coeficiente de variación entre los resultados sea menor al 25%. Al final de esta fase, se registran las temperaturas de las dos ollas, el peso del combustible sobrante, leña quemada y cenizas.

Figura 4

Temperatura Durante las Fases del WBT (CCA, 2014)



Durante el WBT el Sistema de Monitoreo de Emisiones en Laboratorio (LEMS, por sus siglas en inglés) cuantifica las emisiones de CO, CO₂ y PM_{2.5} perjudiciales mediante la recolección y registro durante el desarrollo del protocolo. La recolección de estas emisiones hace posible conocer la cantidad total de contaminación liberada al ambiente sin los efectos de ventilación y dilución del aire de una cocina.

La estufa se colocó en la campana recolectora de emisiones y del aire del laboratorio. El flujo, la velocidad y la temperatura de escape se miden en el tubo para evacuar los gases. Se extrae una fracción del flujo a través del sistema por medio de una bomba de succión a través de una línea de muestreo hasta los sensores. Por separado, se registra la medición de la temperatura de la olla 1 de agua con una termocupla. La información de la temperatura, el flujo y las concentraciones en tiempo real se muestran y registran en el “software” del sistema (Anexo A). La generación de los datos durante el protocolo se registra en un archivo **.csv** utilizando el “software” del WBT 4.2.3 provisto para las evaluaciones (Aprovecho Research Center, 2013).

El LEMS contiene un equipo especializado para registrar las emisiones de gases. Para reconocer la cantidad de CO utiliza un sensor que es una celda electroquímica. La conductividad entre dos electrodos en esa celda es proporcional a la concentración de CO presente. El sensor de CO₂ utiliza infrarrojos no dispersivos (NDIR, por sus siglas en inglés) para medir la concentración de CO₂ y el voltaje de salida. Es autocalibrable, con gas nitrógeno puro utilizado como referencia cero. El sistema gravimétrico del LEMS da una medición directa del Material Particulado total usando muestreos basados en filtros. Para esto, una bomba de vacío extrae una muestra a través de la línea de muestreo y el orificio crítico, que mantiene el flujo a un ritmo constante de 16.7 L/min. Se utiliza un separador ciclónico para que todo PM_{2.5} sea recogido en un filtro de fibra de vidrio mientras la bomba está encendida.

Categorización de Línea Base y Prototipos Seleccionados Conforme a la Norma Nacional OHN

97001:2017

Para evaluar el desempeño de las estufas se utiliza la Norma Nacional de estufas mejoradas OHN 97001:2017, la cual indica los valores máximos y mínimos permisibles para categorizar a una estufa como mejorada (Categoría A o B) o No Mejorada. Los parámetros de desempeño que están regulados por esta Norma son: consumo de leña, consumo de energía y emisiones totales de CO y PM_{2.5}. El Cuadro 3, contiene las categorías para clasificar las estufas de acuerdo al consumo energético. El Cuadro 4, tiene los rangos permitidos de consumo de leña para que una estufa sea considerada Mejorada. Por último, el Cuadro 5, presenta los valores de reducción de emisiones totales que se utilizan para la clasificación de estas tecnologías. Para categorizar el desempeño de los diferentes prototipos de estufas mejoras, de acuerdo a la Norma Nacional de Estufas Mejoradas OHN 97001:2017, se utilizó estadística descriptiva (medidas de tendencia central y de dispersión).

Cuadro 2

Clasificación de Estufas Mejoradas de acuerdo al Consumo de Energía (OHN, 2017)

Valor máximo permitido	Valor de uso de energía (E) (%)	Categorización
30,000 KJ	$E \geq 30,000$	Estufa No Mejorada
	$15,000 < E < 30,000$	Estufa Mejorada Categoría B
	$E \leq 15,000$	Estufa Mejorada Categoría A

Cuadro 3

Clasificación de las Estufas Mejoradas de acuerdo al Consumo de leña (OHN, 2017)

Valor máximo permitido	Valor del consumo de leña (L) (Kg)	Categorización
1.5 kg de leña	$L > 1.5 \text{ kg}$	Estufa No Mejorada
	$0.8 \text{ kg} < L < 1.5 \text{ kg}$	Estufa Mejorada Categoría B
	$L \leq 0.8 \text{ kg}$	Estufa Mejorada Categoría A

Cuadro 4

Clasificación de las Estufas Mejoradas de acuerdo a las Emisiones Totales Capturadas (OHN, 2017)

Línea Base (Fogón Tradicional)	Valor de reducción relativo (R) (%)	Categorización
CO 13.47 g/MJd	$R \leq 65$	Estufa No Mejorada
	$65 < R \leq 85$	Estufa Mejorada Categoría B
	$85 < R \leq 100$	Estufa Mejorada Categoría A
PM _{2.5} 2,646.08 mg/MJd	$R \leq 65$	Estufa No Mejorada
	$65 < R \leq 85$	Estufa Mejorada Categoría B
	$85 < R \leq 100$	Estufa Mejorada Categoría A

Evaluación del Consumo de Leña en los Prototipos Seleccionados

El consumo de leña es una de las medidas de desempeño estándar proporcionadas por la prueba de ebullición de agua. Este resultado se reporta en gramos y cuantifica la cantidad de combustible requerida para la ejecución del protocolo durante las tres fases. El valor de este parámetro se obtuvo de las hojas de cálculo generadas por el programa. Cada prototipo fue evaluado por triplicado para la obtención de los resultados.

Para la comparación del desempeño entre los modelos, se aplicó estadística inferencial, utilizando los residuales en una prueba de “Shapiro Wilk” para determinar la normalidad de los datos ($P > 0.05$). Seguidamente se aplicó un Análisis de Varianza (ANDEVA) para determinar la existencia de diferencias significativas en consumo de leña, derivados de la variación en los prototipos. Finalmente se aplicó una prueba post hoc de Duncan para la separación de medias estadísticas, en donde se puede observar la diferencia en consumo de leña por cada tratamiento. Los datos fueron procesados en el programa estadístico “InfoStat” versión 2019. El valor de significancia fue del 5%.

Relación entre Consumo de Leña y Emisiones Totales

Los valores de CO y PM_{2.5} obtenidos a partir del monitoreo de las emisiones totales son parámetros considerados en la categorización de estas tecnologías de acuerdo con la Norma OHN 97001:2017. En esta sección se pretende determinar cuál es la dependencia de las emisiones de CO y PM_{2.5} con el consumo de leña, por lo que, se busca encontrar si la eficiencia en el consumo de

combustible tendrá un impacto sobre la reducción de estas emisiones al momento de operar la estufa mejorada, ya que ambos parámetros tienen la misma relevancia al realizar la categorización de los modelos conforme a la normativa.

Para esto, se obtuvieron los datos de emisiones totales de la sección "IWA Performance Metrics", de la hoja del WBT solamente de los modelos operados con el oxigenador. En esta sección se adquiere el valor de emisiones de CO que son reportadas en g/MJd y el de PM_{2.5} en mg/MJd. El consumo de leña se obtuvo de la sección de medidas de desempeño estándar. Para determinar la relación entre el consumo de leña y emisiones totales se aplicó una prueba de correlación de Pearson en donde se estimó la magnitud y la asociación entre estas dos variables. El nivel de significancia para esta prueba fue del 5%. Los datos fueron procesados en el programa estadístico "InfoStat" versión 2019.

Resultados y Discusión

Categorización de Línea Base y Prototipos Seleccionados Conforme a Norma OHN 97001:2017

La Norma OHN 97001:2017 es el elemento que permite categorizar las estufas de acuerdo con su desempeño. Para evaluar la eficacia de las modificaciones incorporadas previo a la obtención del prototipo, se realizó la comparación de los resultados obtenidos mediante el protocolo WBT frente a la línea base del modelo Justa 16 × 24. Adicionalmente se verificó el cumplimiento de los criterios descritos en la norma OHN 97001:2017 y su categorización para la línea base y prototipo Justa 3D.

El Cuadro 1 presenta un resumen del proceso hasta lograr el diseño final del prototipo de la estufa Justa 3D. En el Cuadro 5, se muestra un resumen global de las variables de interés para los objetivos de esta investigación (consumo de leña, CO Y PM_{2.5}), adicionalmente, se han incluido otras variables de interés como el tiempo de ebullición, emisiones de CO₂ e impacto global.

Cuadro 5

Resumen General de Resultados Obtenidos en la Evaluación de Prototipos

Parámetro	Unidad	Justa 16×24 CO	Justa 16×24 SO	Justa 3D CL CO	Justa 3D CL SO	Justa 3D SL CO	Justa 3D SL SO	Justa 3D
Consumo de leña	g/L	1,009.83	1,318.91	1,036.82	1,255.10	1,013.21	1,249.77	733.33
Emisiones de CO	g/MJd	1.77	2.03	1.60	4.85	4.19	4.96	6.17
Emisiones de PM _{2.5}	mg/MJd	860.14	820.55	586.42	513.94	899.92	441.64	553.62
Energía consumida	kJ/L	19,688.70	25,714.80	20,214.82	24,470.61	19,754.61	24,366.75	14,297.70
Tiempo Ebullición	min	41.67	43.15	37.58	29.82	28.34	40.53	26.15
Emisiones de CO ₂	g/L	1,526.20	1,439.75	1,422.71	2,331.81	1,760.31	2,584.01	1,646.22
Impacto Global	gCO ₂ e	1,540.54	1,455.34	1,436.39	2,366.75	1,788.32	2,656.43	1,681.91

En la categorización de estufas mejoradas la Norma OHN 97001:2017 considera cuatro parámetros de desempeño durante el proceso de combustión. Los resultados de estos parámetros de desempeño para el modelo que se utilizó como línea base; la estufa Justa 16 × 24 se muestran en el Cuadro 6. Consecuentemente, el Cuadro 7, presenta la clasificación de los parámetros de desempeño del prototipo de la estufa Justa 3D de acuerdo al criterio de la Norma OHN 97001:2017.

La hoja de cálculo del WBT reporta el consumo de leña en gramos de combustible consumidos para la cocción de 5 L de agua (g/L). El modelo de línea base, la estufa Justa 16 × 24, se clasifica como Estufa Mejorada categoría B cuando opera con el oxigenador, al quitar este componente se mantiene en la categoría B de estufa mejorada, pero el consumo de leña aumenta un 23.42%. El modelo de la estufa Justa 3D presentó el menor consumo de combustible. La reducción en el uso de leña se debe a la eficiencia en la transferencia de calor, la cual incrementó al cambiar la plancha. Disminuir el grosor y la masa total de este componente, facilita la transferencia de calor por conducción de la llama hacia la plancha. Por lo tanto, la estufa Justa 3D se clasifica como una estufa mejorada categoría A de acuerdo al criterio de consumo de leña considerando los parámetros establecidos por la Norma OHN 97001:2017.

Cuadro 6

Resultados de los Parámetros Normalizados de la Estufa Justa 16 × 24, Utilizada como Línea Base

Parámetro	Unidad	Resultados del modelo Justa 16 × 24 CO	Criterio de la Norma
Consumo de leña	g	1,009.83	B
CO	g/MJd	1.77	A
PM _{2.5}	mg/MJd	860.14	B
Energía Consumida	kJ	19,688.70	B

Cuadro 7*Resultados de los Parámetros Normalizados de la Estufa Justa 3D*

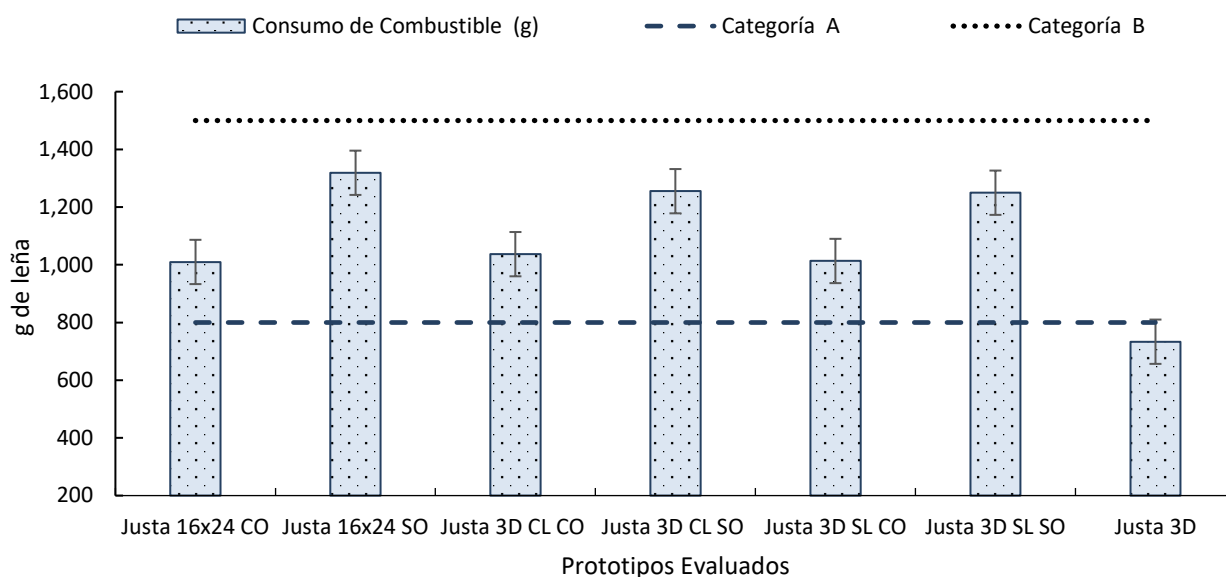
Parámetro	Unidad	Resultados del modelo Justa 3D	Criterio de la Norma
Consumo de leña	g	733.33	A
CO	g/MJd	6.17	No mejorada
PM _{2.5}	mg/MJd	553.62	B
Energía Consumida	kJ	14,297.70	A

La importancia de este resultado radica en un logro que contribuye a reducir el consumo de leña, lo cual es uno de los retos que enfrenta el sector forestal de Honduras. La Encuesta Nacional de Leña hecha en 16 departamentos de Honduras reportó que el consumo promedio en un hogar conformado por cinco personas equivale a 19.6 kg/día. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] y Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano [EAP], 2011). En comparación a la estufa Justa 16 × 24, utilizada como línea base para este estudio, el porcentaje de reducción de la estufa Justa 3D fue de 27.33%.

Las estufas operadas con oxigenador reportan un menor consumo de leña (Figura 5). Esto se debe al ingreso de oxígeno por medio de este componente. El oxígeno es un elemento que favorece el proceso de ignición en la cámara de combustión, eso permite que haya un proceso de combustión completa. Cuando no se incorpora el oxigenador en la estufa hay mayor producción de carbón, tal hecho se debe a una limitada disponibilidad de oxígeno que favorece el proceso de pirólisis.

Figura 5

Consumo de Leña de los Prototipos Evaluados



Para categorizar las estufas en términos de emisiones de CO la Norma OHN 97001:2017 utiliza como línea base las emisiones generadas por el fogón tradicional. El valor de CO reportado para el fogón tradicional es de 13.47 g/MJd. Los resultados de las evaluaciones en los diferentes modelos muestran que la estufa Justa 16 x24 se clasifica como una estufa mejorada categoría A en emisiones totales de CO (Figura 6). Sin embargo, el prototipo Justa 3D solamente se alcanza una reducción del 45.80% frente al fogón tradicional, obteniendo una categorización de estufa no mejorada para este parámetro.

Las emisiones de CO están relacionadas con la proporción y mezcla de oxígeno en la reacción de ignición. El oxígeno es un elemento indispensable que permite completar las reacciones en el proceso de combustión. Cuando la cantidad de este elemento en la combustión es insuficiente hay un proceso incompleto en la reacción, en donde aún quedan elementos capaces de ser oxidados como el CO. Investigaciones centradas en el proceso de combustión indican que una de las condiciones que limitan una reacción completa es la presencia inadecuada del comburente. Cuando la cantidad de aire

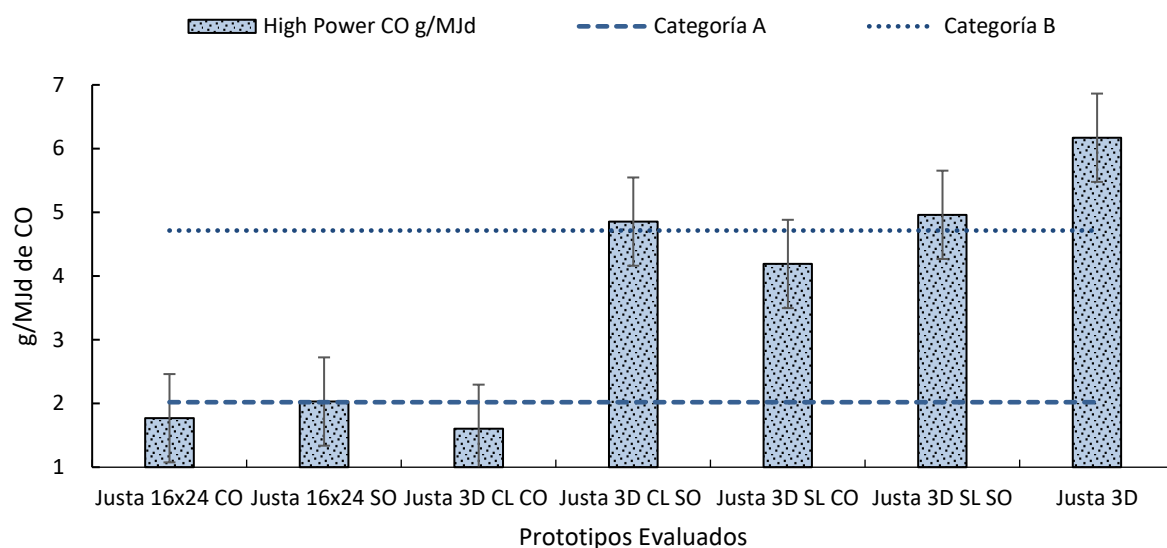
mezclado con el combustible es insuficiente, se producen pérdidas de energía y procesos de liberación de contaminantes como el CO (Castells, 2005).

Los resultados de emisiones de CO para el prototipo Justa 3D refleja un diseño con deficiencias en el mantenimiento de una cantidad adecuada de oxígeno en el proceso de combustión. Una de las modificaciones que pudo influir sobre este resultado fue la reducción del área para evacuación de las emisiones en la salida en la pared de deshollinado, que ralentiza la velocidad de salida de los gases calientes evitando el ingreso de aire en la cámara de combustión, obstaculizando la mezcla apropiada de oxígeno con el combustible. Los modelos Justa 16 × 24 y Justa 3D con ladrillo, operando con el oxigenador, fueron los únicos que redujeron las emisiones de CO en más del 85% respecto al fogón tradicional.

El diseño de una estufa debe garantizar un suministro adecuado de oxígeno en donde la combustión sea lenta y se genere la menor cantidad de CO. Esto es necesario porque la reacción de los combustibles que contienen carbono se lleva a cabo en dos etapas. La primera en donde el oxígeno reacciona con el combustible y se forma el CO. En la segunda reacción, el CO reacciona con más oxígeno y se forma el CO₂. La primera reacción se caracteriza por ser hasta 10 veces más rápida que la segunda. Por lo tanto, si la proporción de oxígeno es pequeña, o, si no se mezcla de forma adecuada con el combustible, esto contribuirá al incremento de las emisiones de CO (Baeza Romero y Rodríguez Cervantes, 2018). En el caso del modelo Justa 3D con ladrillo y oxigenador, se hace notar que el área de salida de emisiones es mayor que la disponible para la estufa Justa 16 × 24, sin embargo, el ladrillo colocado al frente de la cámara regula el paso del oxígeno obteniendo una menor generación de CO. Por otra parte, el prototipo final de la Justa 3D, aunque genera la mayor cantidad de emisiones de CO, reporta el menor tiempo para alcanzar la temperatura de ebullición. Por lo tanto, aunque el diseño de la estufa Justa 3D reduce el consumo de leña y el tiempo de cocción, requerirá una modificación en su diseño que permita una mezcla adecuada de los gases de la combustión.

Figura 6

Emisiones de CO de los Modelos de Estufas Evaluados y los Parámetros Establecidos por la Norma OHN 97001:2017.



El $PM_{2.5}$ es el material que tiene un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras y forma parte de los componentes presentes en las emisiones totales de la estufa. El resultado obtenido para el prototipo Justa 3D fue de 553.61 mg/MJd (Cuadro 7). Este valor presenta una reducción del 79.08% respecto a las emisiones del fogón tradicional, alcanzando una categoría B de acuerdo con la Norma OHN 97001:2017.

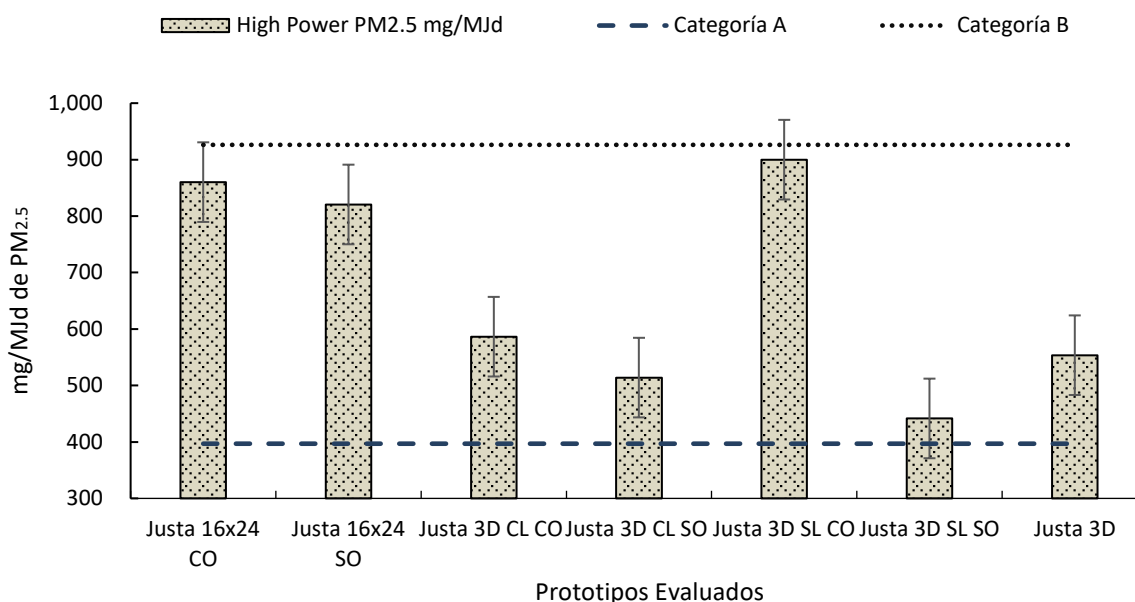
Este material particulado constituye un problema de contaminación atmosférica ya que se considera precursor del carbono negro u hollín, producto de la combustión incompleta de la biomasa. Aunque el carbono negro es un contaminante climático de corta duración, puede tener importantes impactos directos e indirectos en el clima, la agricultura y la salud humana. El impacto de calentamiento del carbono negro en el clima es de 460 – 1,500 veces superior al del CO_2 por su efectividad para absorber la luz y calentar el entorno. Las actividades de cocción con leña y la calefacción doméstica representan el 58% de las emisiones mundiales de carbono negro (A. Cortés y Ridley, 2013; Mardones Poblete y Fuentes Peralta, 2017).

Por otra parte, el material particulado también genera impactos a la salud, por las partículas que tienen un diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros, ese diminuto tamaño confiere un alto potencial para ingresar a las regiones más profundas de los pulmones y facilitar el transporte de compuestos químicos al torrente sanguíneo. Además, puede generar otros impactos en la salud como la muerte prematura en adultos con enfermedades cardíacas y pulmonares, accidentes cerebrovasculares, ataques cardíacos, enfermedades respiratorias crónicas como la bronquitis, asma agravada y otros síntomas cardiorrespiratorios. En niños, provoca muertes prematuras por infecciones agudas de las vías respiratorias, como la neumonía. Se estima que 7 millones de muertes prematuras se atribuyen a la contaminación del aire por $PM_{2.5}$ en el hogar y el ambiente (Climate & Clean Air Coalition, 2021)

El modelo con menos emisiones de $PM_{2.5}$ es el de la estufa Justa 3D sin ladrillo y sin oxigenador (Figura 7). Sin embargo, la tendencia general observada en los resultados es que cuando no se incorpora el oxigenador en los modelos de las estufas 3D la generación de $PM_{2.5}$ disminuye. Esto se debe a que hay más pirólisis y se genera un mayor remanente de carbón que no favorece el arrastre de las partículas a la fase gaseosa. Ninguno de los modelos evaluados llegó a la categoría A establecida por la Norma OHN 97001:2017 por lo tanto, este parámetro continúa siendo un reto en el diseño de estufas mejoradas.

Figura 7

Emisiones de $PM_{2.5}$ de los Modelos Evaluados y los Parámetros de Clasificación Establecidos por la Norma OHN 97001:2017



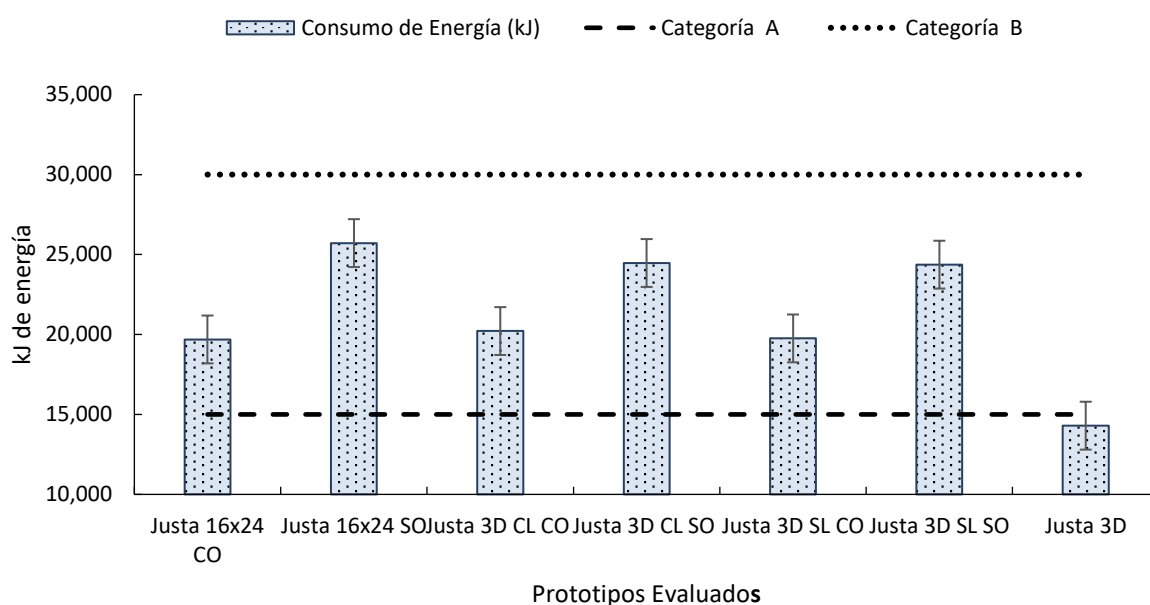
El consumo de energía es un parámetro que indica la transferencia de calor, medido en kJ, a la olla, hasta llevar 5 L de agua a su punto de ebullición. El valor que obtuvo el prototipo Justa 3D la ubica en categoría A para este parámetro. Se hace notar que la energía entregada está vinculada al consumo de leña. De forma paralela se determinó que el modelo de la estufa Justa 16 × 24 operada con oxigenador alcanzó una categoría B conforme a la normativa (Figura 8).

Los modelos operados con oxigenador tienen una mejora en la combustión entregando más energía con menos leña, esto significa que, al existir mayor flujo de oxígeno se entrega más energía a la plancha, incrementando la transferencia de calor por conducción. Ocurre lo contrario cuando no se tiene el oxigenador, pues el flujo gaseoso no es estimulado por el ingreso de una corriente de aire, aumentando la conversión de leña en carbón mediante la pirólisis, lo que implica que el combustible no se quema en su totalidad y esto se traduce en una menor transferencia de calor a la plancha.

A partir del análisis de estos resultados, se planteó que para minimizar el consumo de energía el cambio del diseño en la plancha era requerido. Para esto, se modificaron secciones de este componente, favoreciendo la disminución de masa minimizando los obstáculos para la transferencia de calor por conducción y convección.

Figura 8

Consumo de Energía de los Modelos Evaluados y los Parámetros de Clasificación Establecidos por la Norma OHN 97001:2017



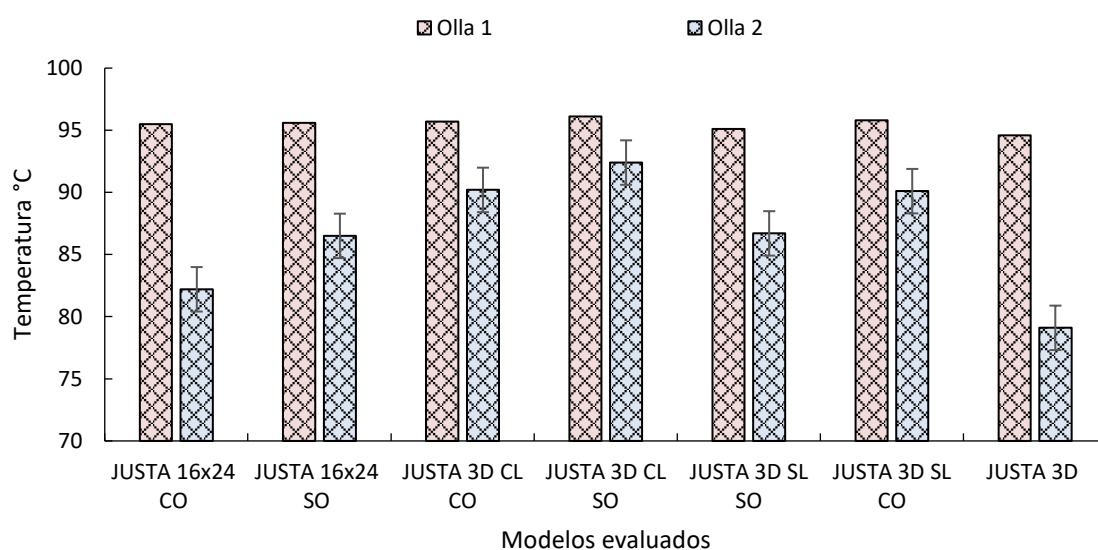
Otras Medidas de Desempeño Estándar

En adición al desempeño de la Justa 3D en cuanto a consumo de combustible, la distribución del calor en la plancha es un aspecto que favorece la aceptación del diseño por parte de las personas usuarias. Las tendencias de distribución del calor en la plancha de los modelos evaluados se representan en el Anexo B. El comportamiento térmico de los modelos evaluados en la tercera fase del WBT se muestra en la Figura 9. La estufa Justa 16 × 24 y Justa 3D, aunque tienen un menor consumo de leña, poseen una distribución heterogénea del calor en la plancha registrando los mayores rangos de diferencia en la temperatura de la olla 1 y la olla 2. Esto puede ser un problema

para los usuarios que desean tener un área en donde puedan cocinar los alimentos utilizando el área. El modelo con menos rango de diferencia entre la olla 1 y 2 fue el de la estufa Justa 3D con ladrillo y sin oxigenador.

Figura 9

Distribución del Calor en la Plancha durante la Fase de Fuego Moderado

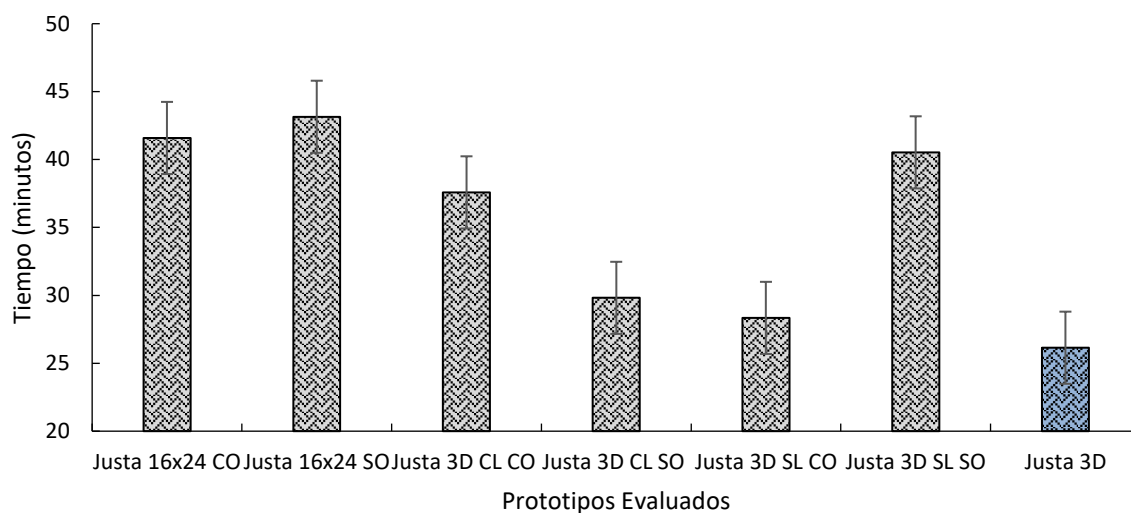


Otro parámetro de desempeño estándar fue el tiempo de ebullición, el cual corresponde al periodo que tarda el agua de la olla 1 en alcanzar su punto de ebullición (96.2 °C). Esta medida sirve para determinar la velocidad con la cual las estufas pueden cocinar alimentos. Se observa que, de todos los modelos evaluados, el prototipo de la estufa Justa 3D presentó la menor cantidad de tiempo en el proceso de cocción (Figura 10). Los modelos que requieren más tiempo para llevar el agua de la olla 1 al punto de ebullición, son aquellos que no incorporan el oxigenador en su estructura. El modelo de la Justa 3D CL SO, es la excepción en este contexto, ya que, aunque no incorpora el oxigenador en su proceso de operación, pero con el ladrillo al frente de la cámara favorece la entrada regulada de oxígeno mejorando el intercambio gaseoso por la ubicación de los leños. En la estufa Justa 3D el

tiempo se reduce porque al disminuir el grosor y masa de la plancha, la transferencia de calor hacia la olla es más rápida.

Figura 10

Tiempo de Ebullición de los Prototipos Evaluados.



Evaluación del Consumo de Leña en los Prototipos Seleccionados

La prueba de Normalidad de “Shapiro Wilks” reflejó que los valores correspondientes al Consumo de leña tienen un nivel de significancia > 0.05 , lo cual es un indicador de la distribución normal de los residuos. La prueba paramétrica ANDEVA mostró que hubo diferencia significativa ($P < 0.05$) en el consumo de combustible de los diferentes prototipos de Estufas que se evaluaron. Los valores promedios del consumo de leña de cada modelo evaluado se muestran en la Figura 16.

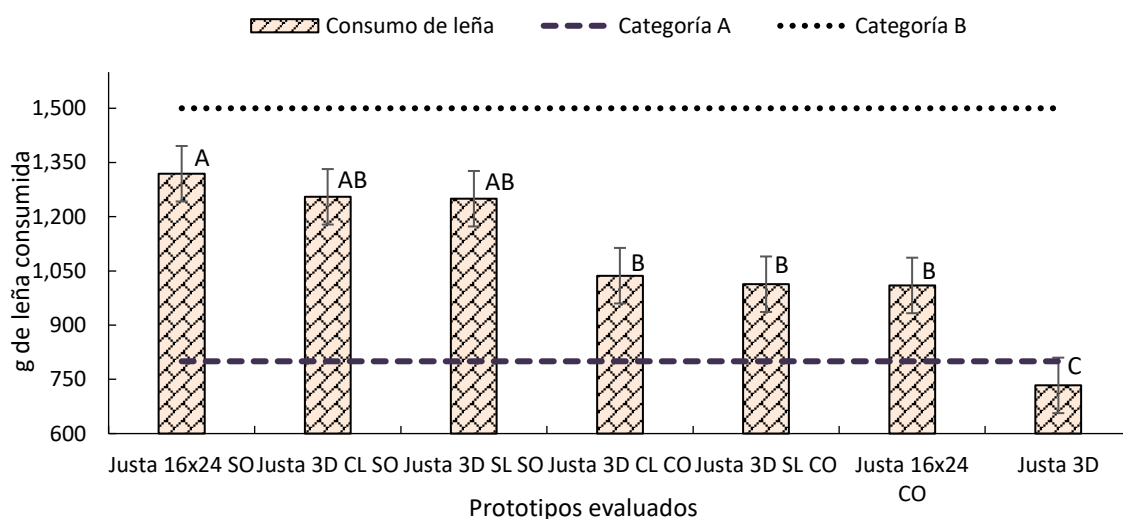
La estufa Justa 16×24 SO fue el modelo con mayor consumo de leña. Aunque los prototipos Justa 3D CL SO y Justa 3D SL SO tienen un menor consumo de leña, no presentan diferencia significativa ($P > 0.05$) con la estufa Justa 16×24 SO. Las estufas que no incorporan el oxigenador son las que reportan un mayor consumo de combustible. Los modelos; Justa 16×24 CO, Justa 3D CL CO y Justa 3D SL CO, reflejan diferencia significativa ($P < 0.05$) en el consumo de leña respecto a la estufa

Justa 16 × 24 SO, pero estadísticamente, no presentan diferencias significativas ($P > 0.05$) al compararse con los modelos Justa 3D CL SO y Justa 3D SL CO (Figura 11).

Estos resultados indican que las modificaciones que se hicieron en la estufa Justa 16 × 24 tradicional para generar los primeros prototipos de la estufa Justa 3D no representan diferencia significativa ($P > 0.05$) en el consumo de leña operando con o sin el oxigenador en la cámara de combustión, es decir que estadísticamente, el consumo de leña es el mismo que el de la estufa Justa 16 × 24 CO. Finalmente, los resultados obtenidos para el prototipo final de la Estufa Justa 3D presentan diferencias significativas ($P < 0.05$) en comparación a los demás prototipos y el modelo utilizado como línea base. El consumo promedio de esta estufa fue de 733.33 g/leña con un coeficiente de variación del 13.37% durante las evaluaciones en el laboratorio.

Figura 11

Diferencia en el Consumo de Leña de los Prototipos Evaluados



El consumo de la estufa Justa 3D CL CO fue de 1,036.82 g/leña y el de la Justa 3D SL CO fue de 1,013.21 g/leña. Por lo tanto, el ladrillo al frente de la cámara de combustión no representó un componente clave para reducir el consumo de leña, por otra parte, al no conocer la tendencia de adopción de esta pieza, se retiró del diseño. El reto planteado para el diseño del prototipo consistió

en alcanzar un consumo de combustible inferior a 800 g de leña durante el protocolo para obtener una categoría A. Para esto, las modificaciones finales incorporadas fueron la reducción en las salidas para evacuar el humo y el cambio de la plancha metálica. Se redujo el área de las salidas en aproximadamente un 28%, por lo que el prototipo final sólo tuvo disponible 15 pulgadas cuadradas de área para la salida de gases. Se hizo una evaluación exploratoria solamente con esta modificación y el consumo de leña fue de 904.80 g/leña lo que representa una reducción del 10.7% en comparación al consumo de leña de la Justa 3D SL CO.

El otro cambio en esta estufa fue la plancha metálica. La nueva plancha para la estufa Justa 3D tiene las mismas dimensiones de la plancha anterior (16 × 24) y un calibre de 1/8 de pulgada. A diferencia de la plancha tradicional, esta no cuenta con los refuerzos internos. Los cuales son dos piezas (del mismo material de la plancha) de menor tamaño colocados con el propósito de aumentar la resistencia del metal al estar en contacto con el fuego. Por lo tanto, el calibre en la plancha tradicional es mayor al sumar el grosor del refuerzo con la plancha principal superior, lo que se traduce como una mayor masa que debe ser calentada con la energía generada por la combustión. Al quitar los refuerzos, la transferencia del calor a la olla es más eficiente y permite que se disminuya el consumo del combustible en un 27.62% en comparación a la estufa Justa 3D SL CO.

Otra diferencia estructural de la plancha fue el cambio del tubo industrial colocado en los bordes por una platina metálica. Esta platina conserva la misma altura del tubo industrial pero no el ancho, el calibre de esta platina es de 1/8 de pulgada en comparación al tubo que tiene un ancho de una pulgada. En términos económicos, este cambio permite disminuir los costos en aproximadamente un 15% para la construcción de las planchas, pero hay otros aspectos como la durabilidad de la pieza y la aceptación por parte de las usuarias que se debe evaluar.

Relación Entre Consumo Específico de Combustible y Emisiones Totales de los Modelos con Oxigenador

Después de haber alcanzado la meta en reducción de leña mediante el prototipo de la estufa Justa 3D, se determinó la relación que existe entre el consumo de leña y las emisiones de CO y PM_{2.5}. Se hace notar que, para el desarrollo de este cálculo, solamente se tomaron los datos de los modelos operados con el oxigenador, ya que, de acuerdo con los resultados obtenidos este componente es esencial en la estufa mejorada para maximizar el proceso de combustión.

Monóxido de Carbono

Para apreciar la magnitud de relación entre el consumo de leña y las emisiones totales de CO y PM_{2.5} se estimó la correlación de cada una de estas variables con el consumo de leña. El índice de Pearson para emisiones de CO y consumo de leña fue de -0.46 (inversamente proporcional) con una probabilidad de 0.09, este valor es más alto que el nivel de significancia ($P > 0.05$) lo que indica es que estadísticamente no hay relación entre el consumo de leña y las emisiones de CO.

Este resultado del índice de Pearson para emisiones de CO y consumo de leña es reforzado con el argumento de Castell (2005) en donde explica que la producción de CO se genera por reacciones incompletas. Cuando una reacción de combustión es incompleta se encuentra que los gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados como el CO. La reducción del consumo de combustible no es un indicador del mantenimiento óptimo de las condiciones de oxigenación en la cámara, así como su mezcla con el combustible, sino por el contrario que se optimizaron variables como el flujo de emisiones y la transferencia de calor dentro de la estufa.

El enfoque no solamente debe ser el flujo de oxígeno sino que se infiere que al existir un exceso de aire, también habrá disminución en la temperatura de la llama y pérdida de calor por la chimenea, como resultado del arrastre de los gases de combustión (Castells, 2005). Los modelos de la estufa Justa 16 × 24 con y sin oxigenador, así como el modelo de la estufa Justa 3D CL CO presentan más tiempo de cocción que el resto de las estufas (41.61, 43.15 y 37.58 minutos, respectivamente)

(Figura 10). Estos modelos, juntamente con el de la Estufa Justa 3D CL CO, son los prototipos con menos emisiones de CO (Figura 6). Sin embargo, no se puede inferir que al aumentar el tiempo disminuyen las emisiones pues el tiempo no es una medida de la velocidad de combustión sino de la velocidad de transferencia de energía a la olla. Esto no implica que el proceso de combustión sea más lento, sino una mayor velocidad de flujo de las emisiones que no permite una correcta transferencia de calor a la plancha. Las emisiones están más frías por la mezcla de aire y además se mueven más rápido, ralentizando la transferencia de calor hacia la plancha, lo cual deriva en mayor consumo de combustible.

La concentración de este elemento incrementadas emisiones intramuros, lo que genera un efecto tóxico sobre el cuerpo humano ocasionado por la reacción del CO con la hemoglobina. El CO tiene la propiedad de unirse fuertemente a la hemoglobina, que es responsable del transporte de oxígeno en la sangre. El complejo que se forma se conoce con el nombre de carboxihemoglobina (COHb). La afinidad de la hemoglobina por el CO es 200 veces mayor que por el oxígeno. Por lo tanto una cantidad pequeña de CO puede inactivar el sitio activo de la hemoglobina y detener el transporte de oxígeno, esto puede provocar lesiones cerebrales al no poder aportar una cantidad suficiente de oxígeno a las neuronas (Castells, 2005).

Material Particulado (PM_{2.5})

Para las emisiones de PM_{2.5} el índice de Pearson fue de 0.63 (directamente proporcional) con una probabilidad de 0.01, siendo menor con el nivel de significancia ($P < 0.05$). Lo anterior indica que la fuerza de asociación entre el consumo de leña y las emisiones totales de PM_{2.5} es moderada con un 63% de covariación entre ambas variables.

En el proceso de ignición se generan partículas finas, polvos, que en parte se deben a la naturaleza de los combustibles y en otra parte al diseño de la estructura de combustión (Castells, 2005). El arrastre de material particulado se genera cuando la velocidad de circulación de los gases es elevada. La temperatura es el parámetro más influyente en la formación del hollín puesto que las velocidades de la reacción se ven implicadas durante la pirólisis. Al aumentar el volumen de combustible en el sistema, con un mecanismo de aireación, aumenta la velocidad de la reacción y las partículas de combustible no completan la reacción de combustión por la velocidad del flujo de gases, por lo tanto, aumenta la cantidad de hollín formado. En la pirólisis ocurre lo contrario, al aumentar el volumen de combustible y sin un mecanismo de aireación hay una menor temperatura y eso disminuye la generación de material particulado (Salvo Barco, 2014). La correlación entre el consumo de leña y emisiones de PM_{2.5} es directamente proporcional y este argumento afirma que al aumentar el consumo de combustible también puede aumentar la concentración de este componente en las emisiones.

Por otra parte, se debe considerar que el material particulado también es biomasa que no estuvo suficiente tiempo en contacto con la llama. Tiene sentido que la velocidad del flujo de emisiones (lenta) favorezca la combustión de este material particulado. Además, si esta velocidad es lenta, también se favorece la transferencia de calor a la plancha y esto se implica que hay un calentamiento más rápido de la olla y un menos consumo de combustible.

Desde el punto de vista ambiental, el material particulado es capaz de generar contaminación atmosférica, lo que altera la composición del aire por la entrada de partículas en suspensión, ya sean de origen natural o antropogénico. Estas partículas y su posterior deposición, pueden generar efectos en el clima, los ecosistemas y los seres vivos (Viana Rodriguez, 2003). La distribución granulométrica del Material Particulado es muy importante en la salud. Las emisiones por encima de las 5 μm son filtradas por la laringe, las de intervalo comprendido entre 5 y 0.5 μm son interceptadas por los cilios de los bronquios y bronquiolos. Es por eso que este tipo de partículas son realmente peligrosas para la salud una vez que entran en los alveolos pulmonares, pueden generar agentes que se combinan con las macromoléculas nucleófilas, desencadenando procesos de degradación celular, tales como el enfisema o el cáncer (Castells, 2005).

Estudios locales hechos en zonas rurales de Honduras con mujeres que utilizaban estufas tradicionales y otro grupo que utilizaban estufas mejoradas demostró que la contaminación del aire en los hogares está relacionada con los trastornos cardiometabólicos, como la prediabetes y la diabetes tipo II. Los resultados indicaron que el aumento de la contaminación intramuros ocasiona una mayor prevalencia de prediabetes/diabetes, en donde la concentración de contaminantes en el hogar tiene una correlación mayor al 65% con estas enfermedades (S. Rajkumar et al., 2018; Sarah Rajkumar et al., 2019).

Conclusiones

El modelo final de la estufa Justa 3D consume aproximadamente 733.33 g/leña y 14,297.70 kJ de energía, alcanzando la categoría A en su desempeño energético conforme a la norma OHN 97001:2017.

El modelo de la estufa Justa 3D reportó el menor consumo de leña entre las variantes evaluadas y es estadísticamente distinto al resto de los modelos. El diseño de la plancha para este prototipo, favoreció el alcance de este resultado.

Los modelos operados sin oxigenador reportan un mayor consumo de leña debido a que prevalece el proceso de pirólisis y se genera una mezcla ineficiente de los gases durante la combustión.

Aunque se identifican tendencias de asociación, a partir de los resultados obtenidos no se puede establecer una correlación entre la generación de emisiones de CO y PM_{2.5} y el consumo de leña.

Al favorecer el proceso de pirólisis en los modelos operados sin oxigenador, se disminuye la concentración de material particulado en las emisiones totales, como resultado de la formación de carbón en la cámara de combustión.

Recomendaciones

Evaluar la reducción de las emisiones intramuros en el laboratorio para conocer el impacto que la estufa Justa 3D puede tener en las personas usuarias y así, verificar el cumplimiento de la Norma OHN 97001:2017.

Mantener el uso del oxigenador al operar la estufa. Este componente permite la circulación del aire y conduce a la obtención de resultados favorables en el desempeño de la estufa, particularmente en la reducción del consumo de leña.

Analizar variantes para el prototipo de la estufa Justa 3D CL CO ya que este fue el modelo que reportó menos emisiones de CO. La incorporación de la nueva plancha (sin refuerzos) contribuirá en la reducción del consumo de leña.

Mejorar la estructura del prototipo de la estufa 3D para favorecer el acople efectivo de la nueva plancha, facilitando los procesos de adopción por parte de las personas usuarias.

Referencias

- Aprovecho Research Center. (2013, 17 de julio). *Instructions for Use of the Laboratory Emissions Monitoring System (LEMS)*. Cottage Grove, Oregon, USA. Aprovecho Research Center.
- Aristizábal Hernández, J. D. (2010). Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la Cordillera Oriental. *Colombia Forestal*, 13(2), 245. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2010.2.a05>
- Aristizábal Hernández, J. D. (2014). Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. *Informador Técnico (Colombia)*, 78(1), 12–24. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4880824>
- Baets, N. de. (2018). *Promoting sustainable business models for clean cookstoves dissemination in Honduras*. Climate Investment Funds. https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/cif_case_study_honduras_dtp3_1.pdf
- Baeza Romero, M. T. y Rodríguez Cervantes, A. M. (2018). *Entendiendo el origen y evolución del monóxido de carbono en el aire que respiramos: Química de los procesos atmosféricos: experimentación en laboratorio y medidas de campo*. Revista Técnica de Mediambiente (RETEMA). Universidad de Castilla La Mancha. <https://www.retema.es/articulo/entendiendo-el-origen-y-evolucion-del-monoxido-de-carbono-en-el-aire-que-respiramos-1AF4C>
- Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A. y Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266–272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>
- Banco Mundial. (2021a). *Indicadores: Población rural (% de la población total) - Honduras*. Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS?locations=HN&view=chart>
- Banco Mundial. (2021b). *Indicadores: Población, total*. Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=HN&view=chart>
- Bryden, M., Still, D., Scott, P., Hoffa, G., Ogle, D., Bailis y Goyer, K. (2006). *Principios de diseño para estufas de cocción con leña*. provecho.org/?paybox_id=140
- Castells, E. X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Fundación Universitaria Iberoamericana; Díazde Santos.
- Clean Cooking Alliance. (2014). *Prueba de Ebullición de Agua (WBT versión 4.2.2): Emisiones y eficiencia de las estufas en un entorno controlado de laboratorio*. <https://www.cleancookingalliance.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>
- Clean Cooking Alliance. (2021). *The Clean Cooking Catalog: Product and performance data for the clean cooking sector*. <http://catalog.cleancookstoves.org/>
- Climate & Clean Air Coalition. (2021). *Carbono Negro*. <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/bs/black-carbon>

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe y Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. (2011). *Encuesta Nacional de leña consumo de leña en hogares y pequeña industria en Honduras*. <https://docplayer.es/10895483-Encuesta-nacional-de-leña-consumo-de-leña-en-hogares-y-pequeña-industria-en-honduras-informe-final.html>
- Cortés, A. y Ridley, I. (2013). Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario: La ciudad de Temuco como caso de estudio. *Revista INVI*, 28(78), 257–271. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582013000200008>
- Cortés, V., Tercero, F. J., Valladares, M. y Rodríguez, N. (2020). *Estrategia Nacional Inclusiva para la Adopción de Estufas Mejoradas en Honduras*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. https://snv.org/cms/sites/default/files/explore/download/enaem_aprobado_2_06_2020_compressed_1.pdf
- Energía Sin Fronteras. (2012). *Biomasa y desarrollo: Oportunidades de la biomasa para mejorar el acceso local a la energía en comunidades rurales aisladas de América Latina*. Gráficas Áncora, S.A.
- Flores, W. C., Bustamante, B., Pino, H. N., Saad Al-Sumaiti, A. y Rivera, S. (2019). *A National Strategy Proposal for Improved Cooking Stove Adoption in Honduras: Energy Consumption and Cost-Benefit Analysis: Energy Consumption and Cost-Benefit Analysis*.
- Granderson, J., Sandhu, J. S., Vasquez, D., Ramirez, E. y Smith, K. R. (2009). Fuel use and design analysis of improved woodburning cookstoves in the Guatemalan Highlands. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.06.003>
- Instituto de Conservación Forestal. (2019). *Anuario Estadístico Forestal de Honduras*. <http://sigmof.icf.gob.hn/downloads/Anuario-Forestal-2019.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística. (2018). *Cobertura Forestal 2014 - 2018*. Honduras. <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2020/01/Cobertura-Forestal-2014-2018-INE.pdf>
- Lewis, J. J. y Pattanayak, S. K. (2012). Who adopts improved fuels and cookstoves? A systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 120(5), 637–645. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104194>
- Ludeña, C. E., Salomon, M., Dannecker, C., Grutter, J. y Zelaya, S. (2015). *Identificación y Priorización de “Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA) en los Sectores de Agricultura, Transporte y Eco-fogones en Honduras* (Monografía núm. 343). Washintong, DC. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Mardones Poblete, C. y Fuentes Peralta, J. (2017). Regulaciones para reducir emisiones de MP2.5 y externalidades sobre sus precursores cuando existe disponibilidad de un combustible limpio. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33(3), 505–520. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.13>
- Mobarak, A. M., Dwivedi, P., Bailis, R., Hildemann, L. y Miller, G. (2012). Low demand for nontraditional cookstove technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(27), 10815–10820. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115571109>
- Organismo Hondureño de Normalización (OHN) (2017). *Norma Hondureña. Estufas mejoradas: requisitos y métodos de ensayo para la clasificación y categorización*. (OHN 97001:2017). Tegucigalpa, Honduras.

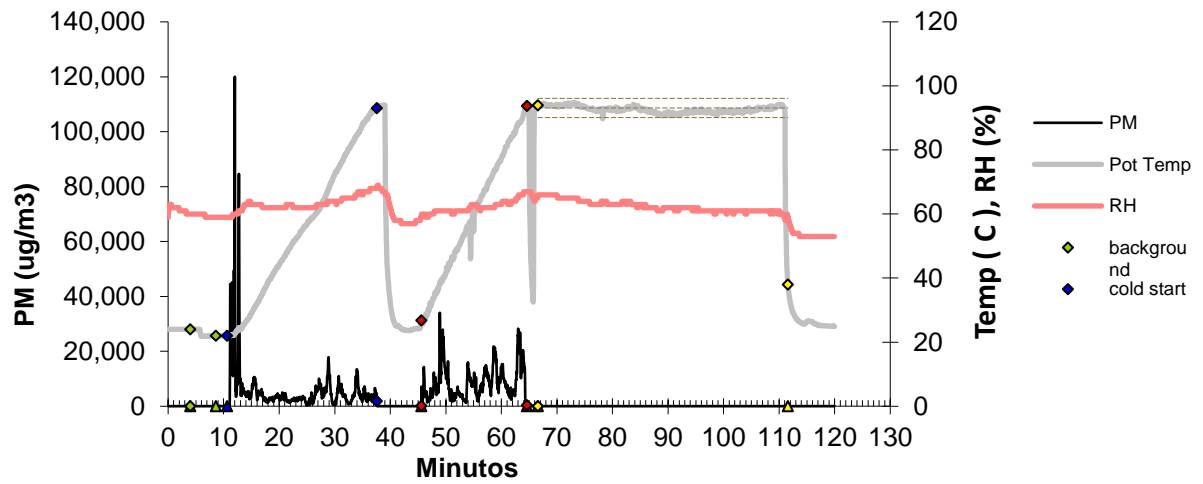
- Organización Mundial de la Salud. (2007). *Energía doméstica y salud: Combustibles para una vida mejor*. Organización Mundial de la Salud.
- Osorto Pinel, A. B [Anibal Benjamin]. (s. f.). *Manual Práctico: Construyendo la Eco-Estufa Justa 16 x 24*. Tegucigalpa, Honduras. Asociación Hondureña para el Desarrollo.
- The Pan American Health Organization. (2016). *Honduras: Historia de las estufas eficientes*. <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2016/HAP-Perfil-Honduras-spa.pdf>
- Pérez Bayer, J. F., Graciano Bustamante, D. S. y Gómez Betancur, J. A. (2013). Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción ecoeficiente con biomasa a diferentes altitudes. *Ingeniería Mecánica*, 16(3), 227–237. <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v16n3/im07313.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>
- Rajkumar, S [S.], Clark, M. L [M. L.], Young, B. N [B. N.], Benka-Coker, M. L [M. L.], Bachand, A. M [A. M.], Brook, R. D [R. D.], Nelson, T. L [T. L.], Volckens, J [J.], Reynolds, S. J [S. J.], L'Orange, C [C.], Good, N [N.], Koehler, K [K.], Africano, S [S.], Osorto Pinel, A. B [A. B.] y Peel, J. L [J. L.] (2018). Exposure to household air pollution from biomass-burning cookstoves and HbA1c and diabetic status among Honduran women. *Indoor Air*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.1111/ina.12484>
- Rajkumar, S [Sarah], Young, B. N [Bonnie N.], Clark, M. L [Maggie L.], Benka-Coker, M. L [Megan L.], Bachand, A. M [Annette M.], Brook, R. D [Robert D.], Nelson, T. L [Tracy L.], Volckens, J [John], Reynolds, S. J [Stephen J.], L'Orange, C [Christian], Good, N [Nicholas], Koehler, K [Kirsten], Africano, S [Sebastian], Osorto Pinel, A. B [Anibal B.] y Peel, J. L [Jennifer L.] (2019). Household air pollution from biomass-burning cookstoves and metabolic syndrome, blood lipid concentrations, and waist circumference in Honduran women: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 170, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.010>
- Ramírez Quirama, J. F. y Taborda Vergara, A. L. (2014). Consumo de leña en fogones tradicionales en familias campesinas del oriente antioqueño. *Producción + Limpia*, 9(1), 99–114. <https://doi.org/10.22507/pml.v9n1a8>
- Ramos-Galarza, C. A. (2020). Los Alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3), 1. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- Romero Salvador, A. (2010). Aprovechamiento de la Biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Revista De La Real Academia De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales (España)*, 104(2), 331–345. <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Salvo Barco, P. (2014). *Formación de hollín en la pirólisis de diferentes biocombustibles oxigenados* [Proyecto de grado]. Universidad de Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Zaragoza. <https://core.ac.uk/download/pdf/289975402.pdf>
- Secretaría de Estado en el Despacho de Energía. (2018). *Balance Energético 2018: Energía y Cambio Climático: hacia un sistema energético más resiliente*. Gobierno de la República de Honduras. https://sen.hn/wp-content/uploads/2020/05/BEN2018_v3.pdf

- Torres Muro, H. A., Agreda Paredes, J. N. y Polo Bravo, C. A. (2012). Evaluación de impacto ambiental producido por el uso de cocinas tradicionales en el área de conservación regional Vilacota-Maure de la región Tacna. *Informador Técnico*, 76, 13. <https://doi.org/10.23850/22565035.25>
- Viana Rodriguez, M. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias* [Tesis Doctorado]. Universidad de Barcelona, Barcelona. http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/34788/1/0Agradecimientos_Indice.pdf
- Wang, X., Franco, J., Masera, O. R., Troncoso, K. y Rivera, M. X. (2012). *¿Qué hemos aprendido del uso de biomasa para cocinar en los hogares de América Central?* (Informe núm. 76222). Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP); Banco Mundial.
- World Health Organization. (2006). *Fuel for life: Household energy and health*. World Health Organization.

Anexos

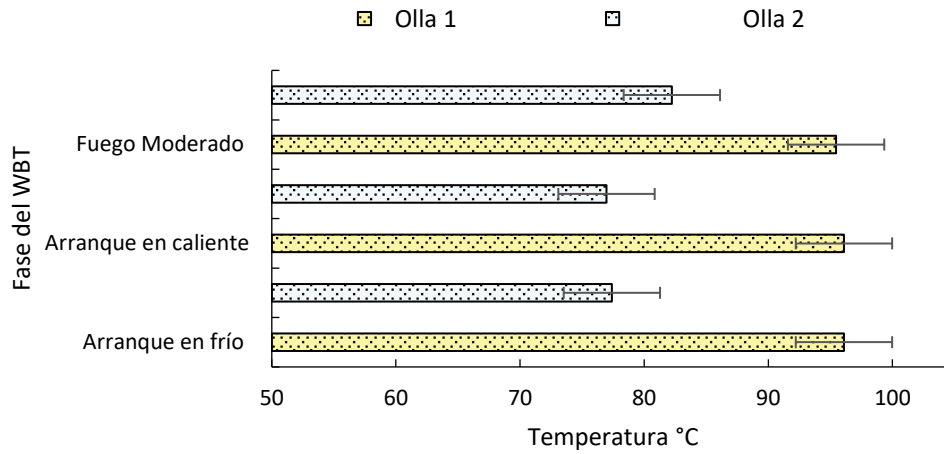
Anexo A

Emisiones de partículas, temperatura de la olla y humedad relativa durante el WBT

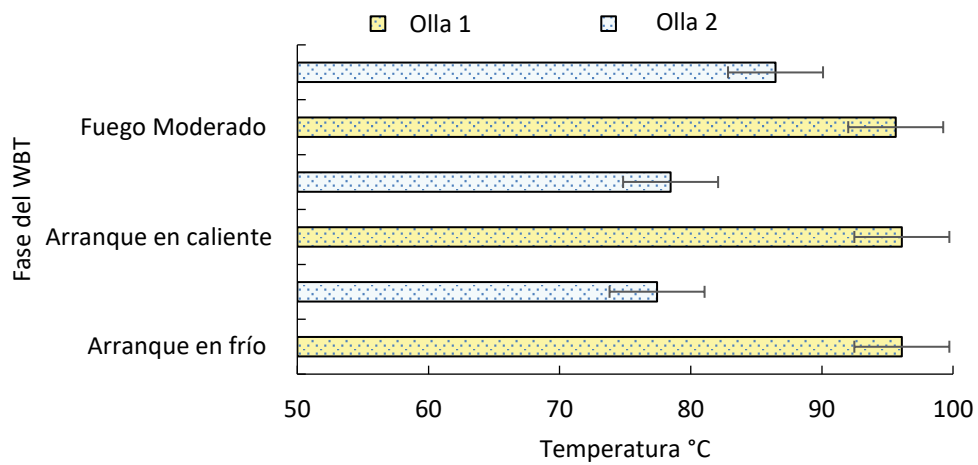


Anexo B

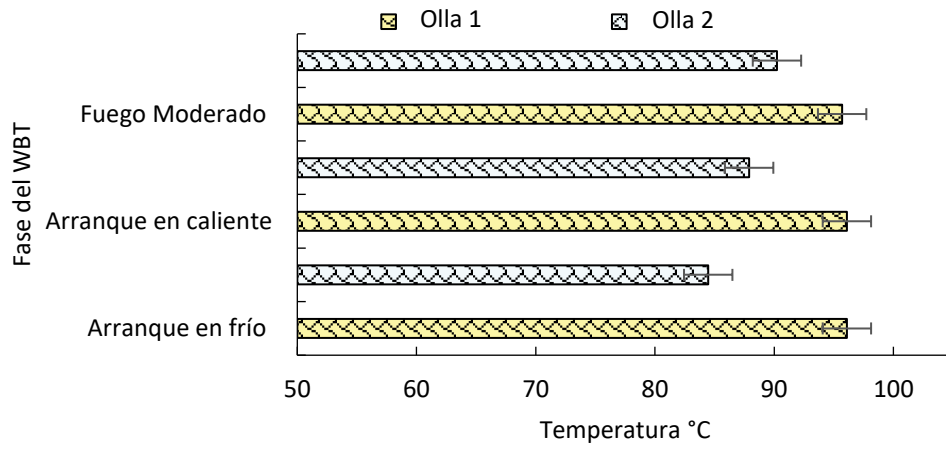
Distribución del calor en la plancha de los modelos evaluados



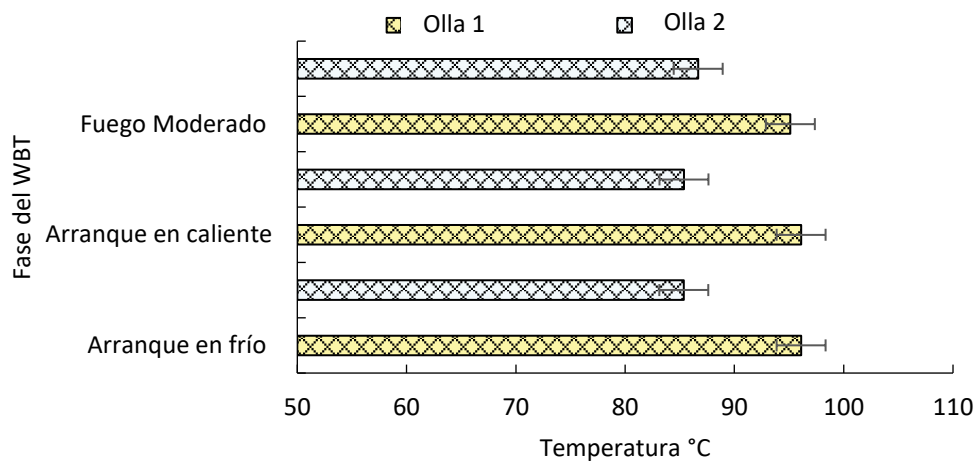
Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 16x24 SO



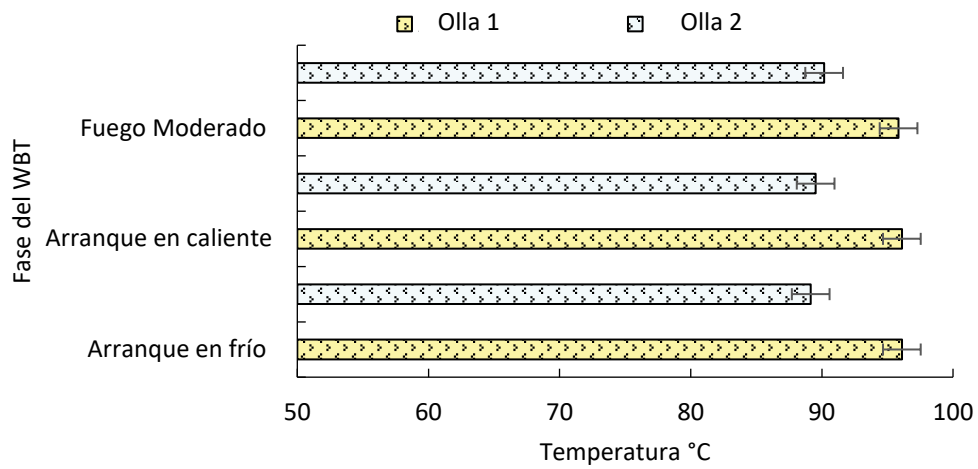
Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 16x24 CO



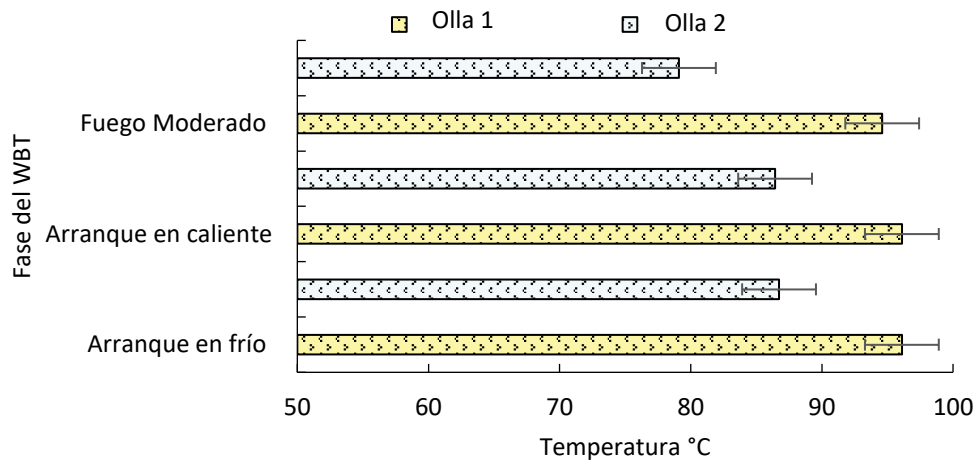
Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 3D CL CO



Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 3D SL CO



Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 3D SL SO



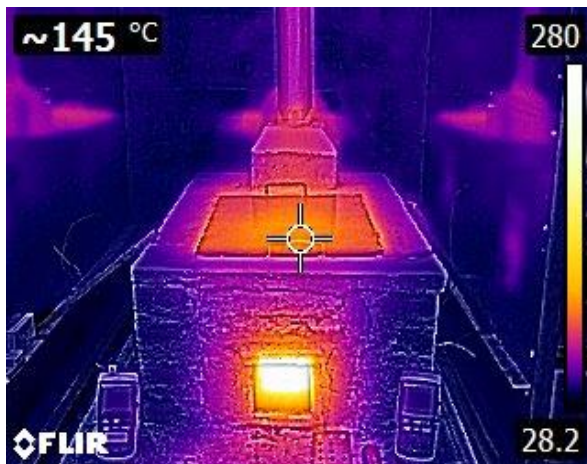
Comportamiento térmico de la Olla 1 y 2 durante el WBT de la estufa Justa 3D

Anexo C

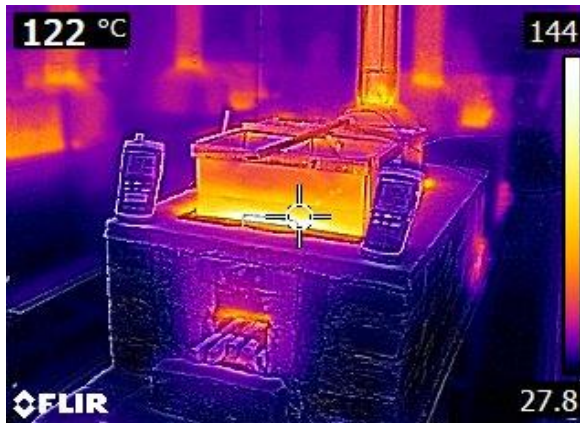
Monitoreo térmico de los modelos evaluados



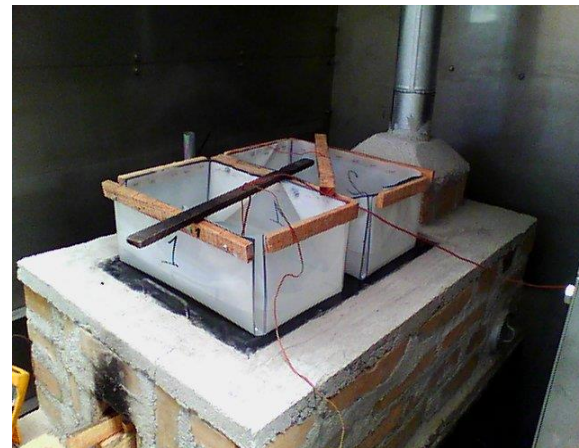
Monitoreo de la distribución del calor de la estufa Justa 16x24 CO en la tercera fase del WBT.



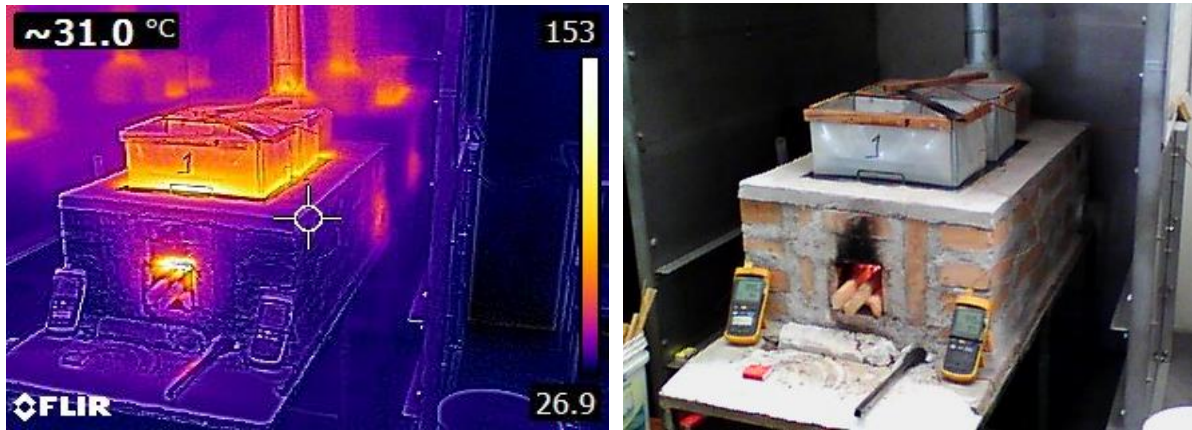
Distribución del calor en la Estufa Justa 16x24 SO al final del WBT



Monitoreo de la distribución del calor en la Estufa Justa 3D CL CO



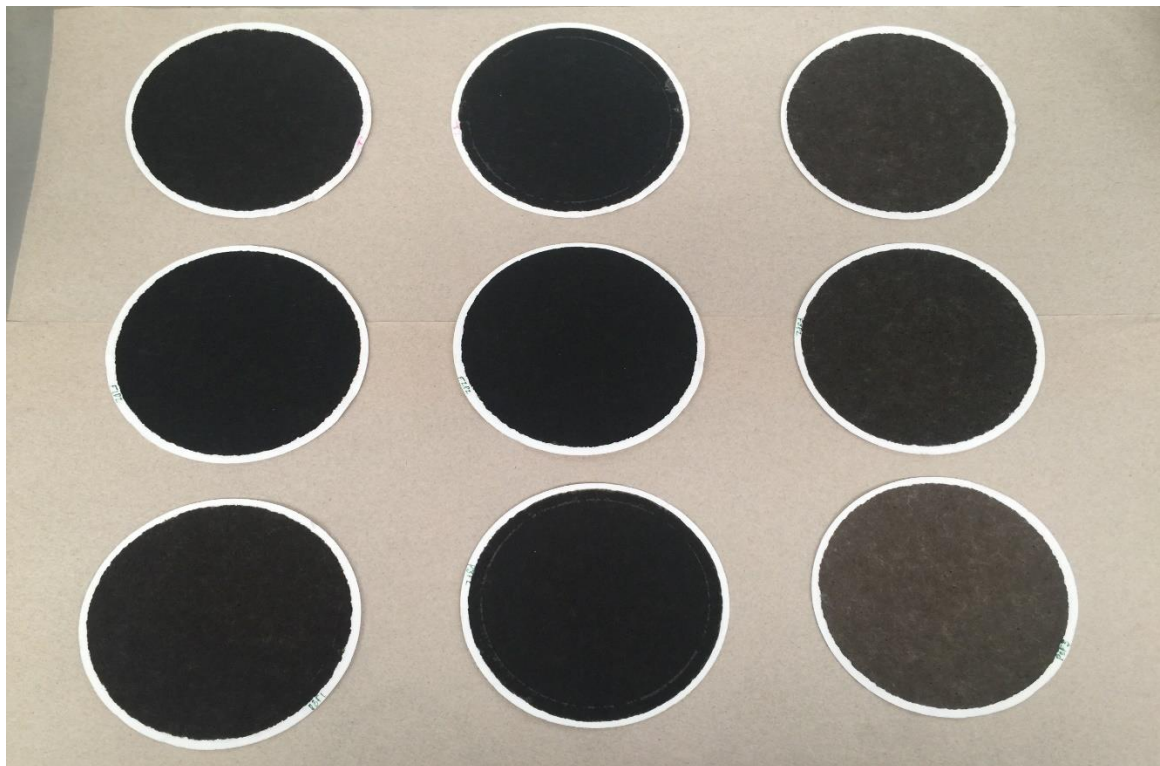
Distribución del calor en la estufa Justa 3D CL CO en tercera fase del WBT



Monitoreo de la distribución del calor en la Estufa Justa 3D SL CO

Anexo D

Filtros de las tres evaluaciones WBT de la estufa Justa 3D



Anexo E

Emisiones totales y consumo de leña de los modelos con oxigenador

Prototipo	Alta Potencia CO g/MJd	Alta Potencia PM _{2.5} mg/MJd	Consumo de leña
Justa 16x24 CO	1.63	966.20	1,115.09
Justa 16x24 CO	1.83	935.89	980.12
Justa 16x24 CO	1.85	678.32	934.29
Justa 3D CL CO	1.78	562.37	998.41
Justa 3D CL CO	1.48	596.83	973.82
Justa 3D CL CO	1.55	600.04	1,138.22
Justa 3D SL CO	2.70	1,163.34	976.16
Justa 3D SL CO	2.55	718.35	966.87
Justa 3D SL CO	5.46	1,612.23	1,236.97
Justa 3D SL CO	3.18	486.69	918.48
Justa 3D SL CO	4.68	669.23	1,022.63
Justa 3D SL CO	6.57	749.62	958.16
Justa 3D	7.05	565.48	743.94
Justa 3D	6.17	627.05	744.28
Justa 3D	5.29	468.31	711.77