

**Evaluación del desempeño de estufas
mejoradas portátiles operadas con
combustibles sólidos alternativos**

María Anthonella León Abad

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del desempeño de estufas mejoradas portátiles operadas con combustibles sólidos alternativos

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

María Anthonella León Abad

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Evaluación del desempeño de estufas mejoradas portátiles operadas con combustibles sólidos alternativos

María Anthonella León Abad

Resumen. La leña es el combustible primario del 55% de la población hondureña, principalmente en el sector rural. Esto ha generado presión en los bosques y exposición constante de las usuarias a compuestos contaminantes. La introducción de tecnologías más eficientes y combustibles más limpios han sido la vía para solucionar estos problemas. Este estudio se basó en la evaluación de combustibles sólidos alternativos a la leña de pino para operar la estufa mejorada HM-4000, seleccionados acorde a su disponibilidad, potencial calorífico y facilidad de manipulación. La palma de coco (*Cocos nucifera*), carbón (*Mimosa tenuiflora*), briquetas de aserrín y bagazo de caña de azúcar fueron evaluados, optimizando el tamaño de estos acorde a las dimensiones de la cámara de combustión de la estufa. Se construyó una briqueteadora para la densificación del aserrín y bagazo. Se evaluó el desempeño de la estufa mediante el protocolo de ebullición de agua, utilizando los combustibles seleccionados. Los resultados indican que el pino no es el combustible óptimo para operar la estufa HM-4000, aprovechando solamente el 22% de su potencial calorífico. Las briquetas de aserrín y bagazo tuvieron la mayor eficiencia energética y generaron menos emisiones. No se obtuvo diferencia significativa en el desempeño de la estufa al operar con pino o *Mimosa tenuiflora*, sin embargo, la palma de coco no representa una alternativa a la leña de pino por su baja eficiencia energética y generación emisiones superior a los demás combustibles evaluados.

Palabras clave: Biomasa, briquetas, eficiencia energética, emisiones.

Abstract. Firewood is the primary fuel for 55% of the Honduran population, mainly in the rural sector. This situation has generated high demand for forest resources and health issues due constant exposure of users to emissions The introduction of more efficient technologies and cleaner fuels has been the way to solve these problems. This study focused on the evaluation of alternative solid fuels to pine wood, to operate the improved HM-4000 stove, which were selected according to their availability, heat value and handling. Coconut palm (*Cocos nucifera*), charcoal (*Mimosa tenuiflora*), sawdust briquettes and sugar cane bagasse were evaluated. The size of each fuel was optimized according to the dimensions of the stove combustion chamber. Stove performance was evaluated using the water boiling test with selected fuels The results indicate that the pine is not the optimum fuel to operate the HM-4000 stove, taking advantage of only 22% of its energy potential. Sawdust and bagasse briquettes had the highest energy efficiency and generated lower emissions. There was no significant difference in the performance of the stove when operating with pine wood or *Mimosa tenuiflora*, however, coconut palm does not represent an alternative to pine wood because of its low energy efficiency and higher emissions generation compared to the rest of evaluated fuels.

Key words: Biomass, briquettes, emissions, energy efficiency.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
4. CONCLUSIONES.....	34
5. RECOMENDACIONES.....	35
6. LITERATURA CITADA	36
7. ANEXOS	40

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Poder calorífico de los combustibles sólidos.....	5
2. Resumen de pruebas de ebullición de agua con pino	14
3. Resumen de pruebas de ebullición de agua con palma de coco y aserrín	15
4. Resumen de pruebas de ebullición de agua con bagazo y <i>Mimosa tenuiflora</i> ..	15
5. Consumo de combustible húmedo (g) mediante prueba Duncan	17
6. Prueba Duncan en el consumo de combustible seco (g)	18
7. Prueba Duncan en la energía inicial (kJ)	19
8. Prueba Duncan de la energía liberada (kJ)	20
9. Prueba Duncan en la velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	21
10. Prueba Duncan del total de energía entregada (kJ)	21
11. Prueba Duncan de la eficiencia energética	23
12. Prueba Duncan en carbón vegetal remanente (g)	25
13. Perdida energética por carbón vegetal (%).....	25
14. Prueba Duncan del potencial energético liberado no aprovechado	27
15. Prueba Duncan en las emisiones de dióxido de carbono (g)	28
16. Prueba Duncan en emisiones de monóxido de carbono (g)	30
17. Prueba Duncan en emisiones de material particulado (PM _{2.5})	32

Figuras	Página
1. Diseño de briqueteadora	6
2. Gráfico del balance de energía	11
3. Briqueteadora construida con materiales reciclados	13
4. Gráfico de cajas del consumo de combustible húmedo.....	16
5. Diagrama de dispersión de humedad y consumo de combustible húmedo	17
6. Gráfico de cajas del consumo de combustible seco	18
7. Diagrama de dispersión del consumo de combustible seco y la energía liberada por el combustible seco	19
8. Gráfico de barras de la velocidad de transferencia de energía	20
9. Gráfico de cajas del total de energía entregada a las ollas	22
10. Gráfico de barras de la eficiencia energética de los combustibles	23
11. Diagrama de dispersión del poder calorífico y el consumo de combustible seco	24
12. Diagrama de dispersión de la energía entregada del combustible seco y poder calorífico.....	24
13. Gráfico de cajas del carbón vegetal remanente	26
14. Gráfico de barras del potencial energético no entregado	27

15. Gráfico de cajas de emisiones de dióxido de carbono de los combustibles alternativos	28
16. Diagrama de dispersión de las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible húmedo	29
17. Gráfico de cajas de las emisiones de monóxido de los combustibles alternativos	30
18. Diagrama de dispersión de las emisiones de monóxido carbono y consumo de combustible húmedo	31
19. Gráfico de cajas de las emisiones de material particulado de los combustibles alternativos	31
20. Diagrama de dispersión de las emisiones de material particulado y consumo de combustible húmedo	32

Anexos	Página
1. Filtros sucios del WBT modificado al operar la estufa con palma de coco	40
2. Leños de pino en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.....	40
3. Briquetas de bagazo en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.....	41
4. Briquetas de aserrín en la cámara de combustión de la estufa HM-4000	41
5. Briquetas de bagazo en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.....	42
6. Carbón en la cámara de combustión de la estufa HM-4000	42
7. Foto de briquetas de aserrín secas	43
8. Foto de briquetas de bagazo secas.....	43
9. Datos del balance de energía.	44
10. Datos del balance de energía.....	44
11. Datos del balance de energía.....	45
12. Emisiones contaminantes	45
13. Prueba se normalidad mediante SPSS.....	46
14. Análisis de varianza ANDEVA con un factor	48
15. Prueba Duncan de la energía en el carbón remanente (kJ)	48
16. Prueba de ebullición de agua modificada con pino.....	49
17. Prueba de ebullición de agua con vainas de palma de coco.....	50
18. Prueba de ebullición de agua con briquetas de aserrín.....	51
19. Prueba de ebullición con briquetas de bagazo	52
20. Prueba de ebullición de agua con carbón	53

1. INTRODUCCIÓN

Honduras es uno de los países con menor crecimiento económico y con más habitantes en la región centroamericana. Aproximadamente el 65% de su población vive en situación de pobreza y la mayor proporción de hogares están situados en zonas rurales (Espinasa, Balza, Hinestrosa, Sucre y Anaya, 2017). De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística (2013) el 55% de la población hondureña usa biomasa como su principal fuente de energía por su disponibilidad en las áreas boscosas. Las diferentes especies de pino son de uso tradicional en la comercialización de leña (Barrance et al., 2003).

La leña es utilizada por el sector doméstico para sus actividades de subsistencia. Las mujeres hondureñas de bajos ingresos económicos están gran parte de su día en actividades gastronómicas. Tales como son en el emprendimiento de micronegocios de panaderías, tortillerías, restaurantes, puestos de comida o en sus hogares para alimentar a su núcleo familiar (Ludeña et al., 2015). La obtención de leña para la mayor parte de estas familias conlleva a un uso diario de su tiempo en la recolección del combustible (Soares, Vásquez, de la Rosa y Serrano, 2006). El cual podría ser invertido en otro tipo de actividades, ya sea de índole económico, social o educativo. Solo el 26% de consumidores de leña la compran, estimando que al año esto conlleva un costo de US \$217 por hogar (Ludeña et al., 2015).

Globalmente, la combustión de biomasa es la principal causa de contaminación intradomiciliaria. Las Enfermedades Pulmonares de Obstrucción Crónica (EPOC) se asocian a la inhalación de humo o carbón negro. El cual está compuesto por monóxido de carbono (CO), óxido nítrico y sulfúrico, benceno, benzopireno, radicales libres, aldehídos, material particulado (PM), entre otros. Las partículas pequeñas son más peligrosas para el humano, por ello el PM_{2.5} micras es más peligroso que el PM₁₀ micras debido a que llega a las regiones distales de las vías respiratorias (Lopez, Mongilardi y Checkley, 2014).

La ventilación limitada en combinación con el uso de tecnologías ineficientes ocasiona que el aire contaminado recircule en espacios cerrados. Esto provoca que las usuarias inhalen todos los compuestos del humo emitidos por la combustión en estufas ineficientes (Alvis y De la Hoz Restrepo, s.f). El riesgo es mayor para mujeres y niños que para hombres adultos ya que pasan mayor parte de su tiempo en las cocinas. La Organización Mundial de la Salud señala que la contaminación de aire en los hogares representaba el 2.7% en la carga de enfermedades en el mundo (Rico, Martínez y Estebané, 2013). Las EPOC causan tres millones de muertes anualmente y el 90% de estas se han registrado en países en vías de desarrollo (Lopez et al., 2014).

La cobertura boscosa de Honduras representa el 58.6% del territorio superficial, se compone de 6.59 millones de hectáreas en bosque natural, del cual 2.53 millones son de pino. El

sistema energético tiene una gran dependencia a la leña de pino. El consumo del mismo representa 1.57 Barriles Equivalentes de Petróleo (BEP) por habitante. En comparación con los combustibles fósiles, el pino es de mayor adquiribilidad para las personas del sector rural por su precio y disponibilidad. Ya que la mitad del territorio boscoso aloja aproximadamente el 45% de la población hondureña, siendo éste el extracto con mayor pobreza (Mendieta, 2016; Flores, 2010).

Las actividades antropogénicas son la principal amenaza de los bosques, ocasionando altas tasas de deforestación. Cada año se pierden 670,000 hectáreas de bosque por incendios forestales, procesamiento de productos maderables o cambios de uso del suelo (Flores, 2010). Estudios de desempeño de estufas realizados en diferentes comunidades de Honduras muestran que al utilizar modelos tradicionales de estufas, consumen en promedio 2.45 kg/leña/persona, lo cual equivale a 3.9 toneladas al año por hogar (Yanchapaxi, 2015).

El desarrollo de estufas mejoradas y la utilización de combustibles más limpios se ha basado en el mejoramiento de los procesos de combustión. Puesto que busca reducir el consumo de leña y la generación de emisiones en contraste con fuegos abiertos o estufas tradicionales. Para ello, se han estudiado los principios fundamentales de la combustión (Global Alliance For Clean Cookstoves, s.f). El Dr. Larry Winiarski estableció fundamentos técnicos como referencia para la fabricación de estufas mejoradas. Estos incluyen, una cámara de combustión con forma de codo que permita aislar el fuego, facilite la combustión de la leña según su contacto con el fuego, utilice únicamente el combustible necesario, mantenga un flujo de aire apropiado y permita una entrada de aire veloz y continua. Así mismo, esta debe apoyarse de una reja debajo del fuego y un material aislante del aire caliente. Al diseño de este tipo de cámara se le conoce como Rocket (Bryden et al., 2006).

Actualmente, los modelos de estufas mejoradas existentes tienen un proceso sencillo de combustión de un solo paso, replicando el diseño rocket que consiste en cargar el combustible en la base. Sin embargo, hoy en día se reconoce la necesidad de investigación para desarrollar tanto nuevos diseños de estufas como combustibles alternos más limpios. Asimismo, se busca innovar el uso de materiales propicios para las cámaras de combustión y otras tecnologías (Global Alliance For Clean Cookstoves, 2013).

El éxito de programas de estufas está directamente relacionado a la integración de los factores económicos, sociales, culturales y medioambientales. Dado que la tecnología introducida se debe adaptar a las prácticas y costumbres de las usuarias en determinadas localidades (Germann y Westhoff, 1995). En la actualidad, la Fundación para el Desarrollo Integral de Honduras (FUNDEIH) y el gobierno mediante el programa Vida Mejor han distribuido más de 170,000 estufas del modelo HM-4000 de la marca Envirofit. Los departamentos en los cuales se ha repartido más estufas HM-4000 son Francisco Morazán, Choluteca y Lempira (Envirofit Smarter Living, 2016).

El modelo HM-4000 se caracteriza por ser un modelo estético y moderno de rápida instalación, reducción de un 70% en el consumo de leña en comparación de una estufa tradicional, fácil de limpiar y permite la emisión de menos humo. Así mismo, FUNDEIH declara que los materiales utilizados para su elaboración son de alta calidad con mejoras en

su diseño y tecnología. Por ello, han denominado a esta estufa como la más eficiente mundialmente (FUNDEIH, 2013).

La eficiencia de una estufa mejorada está relacionada con la reducción del consumo de combustible, emisiones y contaminantes intramuros. A pesar que la introducción de esta tecnología reduce el consumo de leña, para lograr reducir la presión en los bosques, es necesario contar con la oferta de combustibles alternativos que mantengan o mejoren el desempeño de las estufas. Los modelos mejorados se encuentran diseñados para operar con leña, sin embargo se han reportado experiencias con el uso de combustibles alternos como vainas de acacia, bellotas de pino, olotes de maíz, entre otros (FAO, 2008). Por lo tanto, la introducción de combustibles alternativos puede representar un factor clave en la adopción de estufas mejoradas.

Las briquetas se obtienen de la compactación o densificación de residuos lignocelulósicos, dando como resultado la concentración eficaz de la energía disponible en la biomasa. Estas pueden ser elaboradas artesanal, semindustrial e industrialmente. Antes del proceso de compactación las partículas deben estar homogenizadas, para luego mezclar con agua y agentes aglutinantes (Martínez, 2015). Existen formulaciones de briquetas sin aglutinante pero esto conlleva a elevados costos de fabricación porque se requiere hacer uso de prensas operadas a altas presiones, equipos de secado y mayor consumo de energía (Cabezas, 2009).

Hay diferentes tipos de densificación según el equipo que se use. Se conoce como densificación por impacto al uso de briqueteadoras de pistón que compacta la biomasa mediante golpeteo a través de un pistón en funcionamiento por un volante de inercia. La densificación por extrusión se realiza mediante una briqueteadora de tornillo que trabaja ejerciendo presión progresivamente con un tornillo sinfín hasta estrechar el material en una cámara. Existen las briqueteadoras hidráulica o neumáticas que trabaja ejerciendo presión mediante uno o varios cilindros (Ortíz, Tejada, Vázquez y Piñeiro, 2004).

Para este estudio se utilizaron hojas de palma de coco (*Cocos nucifera*), briquetas de aserrín, briquetas de bagazo de caña de azúcar, y carbón (*Mimosa tenuiflora*) como posibles combustibles alternativos a la leña. Su aplicabilidad en estufas con cámara de combustión rocket es comparada frente al desempeño de esta tecnología operada con leña de pino. Se consideró la palma de coco como uno de los combustibles para fines de este estudio, debido a sus usos diversificados tales como construcción, accesorios, fertilizantes, alimento y combustibles (Brañas, 2015). El sector costero de Honduras, islas y cayos, utilizan esta especie cocotera para su alimentación. Asimismo, en sus actividades de subsistencia como las de índole culinario o comercial. Ya que se pueden aprovechar los diferentes productos y subproductos tanto para diversificar los ingresos locales o aplicarlos en la medicina tradicional (Castillo, 2005).

El aserrín fue el segundo combustible seleccionado por la abundante cantidad que se genera en los aserraderos. Los procesos de aserrar o re-aserrar generan desperdicios entre el 25 y 50%, por técnicas ineficientes de producción. La falta de información del uso de este material hace que sea descartado rápidamente, ya sea enviándolo a vertederos o quemándolo. La acumulación de aserrín a la intemperie tiene el riesgo de generar incendios o propagar plagas y enfermedades. Se utiliza en la construcción de pellets o briquetas por

ser un combustible de fácil manejo y no demanda hacer mucho uso de tiempo para su recolección (Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras, 2008).

El tercer combustible seleccionado fue el bagazo de caña de azúcar por su disponibilidad y poder calorífico. Es el principal residuo de los procesos productivos de las azucareras (Triana, León, Céspedes y Cámara, 2013). Finalmente, se seleccionó carbón (*Mimosa tenuiflora*) como cuarto combustible por tratarse de una variedad endémica del trópico seco. Actualmente se le considera como una especie oportunista de los bosques severamente intervenidos, que se adapta fácilmente a diferentes tipos de suelo y crece en temperaturas mayores a los 20°C. Su alta tolerancia a la radiación directa del sol le permite desarrollarse propiciamente en el corredor seco centroamericano (Camargo-Ricalde, 2000). Por ello, se considera al carbón negro como una importante especie de los bosques secos del sur de Honduras (Benitez, 2016).

Considerando la importante difusión del modelo HM-4000 en Honduras, y la búsqueda de opciones que promuevan la reducción del consumo de leña, se propusieron los siguientes objetivos para el desarrollo de la presente investigación:

- Desarrollar la línea base del desempeño de la estufa HM-4000, aplicando a prueba de ebullición de agua durante su operación con leña de pino.
- Evaluar la eficiencia energética de los combustibles alternativos frente a la leña de pino al operar la estufa HM-4000.
- Comparar las emisiones generadas por el modelo portátil HM-4000 al operarlo con pino y combustibles sólidos alternativos, procesados para su compatibilidad con la cámara de combustión.

2. METODOLOGÍA

Selección y preparación de combustibles alternativos.

La leña de pino (*Pinus oocarpa*) es el combustible utilizado en el laboratorio del Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM) para categorizar y evaluar el desempeño de una estufa mejorada. La leña de pino se utilizó como combustible testigo para comparar las evaluaciones realizadas con los combustibles alternativos. La dimensión estándar de la leña es de $40 \times 2.5 \times 1.5$ cm y tiene un poder calorífico de 20,817 kJ. La humedad promedio fue de 12% y cada unidad peso 0.114 kg, aproximadamente. Su estructura es uniforme, sin nudos, resinas o textura anormal para evitar la heterogeneidad de las emisiones y evitar variación entre los datos.

Los combustibles alternos seleccionados fueron: vainas de palma de coco (*Coccus nucifera*), briquetas de aserrín, briquetas de bagazo de caña de azúcar y *Mimosa tenuiflora*. Las características consideradas fueron la disponibilidad, potencial energético y el fácil manejo. Para el desarrollo de las pruebas en laboratorio se requirió optimizar las características físicas de los combustibles. Ya que las dimensiones de la cámara de combustión del modelo HM-4000 son 13 cm de ancho, 9 cm de alto y 29 cm de profundidad. El tamaño promedio de los combustibles alternativos se asemejó al tamaño promedio de la leña. Los poderes caloríficos de los combustibles seleccionados se han obtenido de literatura por investigaciones previas, estos son los poderes caloríficos superiores con base en seco (Cuadro 1).

Cuadro 1. Poder calorífico de los combustibles sólidos.

Combustibles	Poder calorífico (kJ/kg)	Referencias
<i>Pinus oocarpa</i>	20,817	(Harker, Sandels y Burley, 1982)
<i>Coccus nucifera</i>	19,000	(FAO, 1993)
Aserrín	15,320	(Energieonderzoek Centrum Nederland, 2002)
Bagazo	17,782	(Agüero, Pisa, Agüero y Torres, 2010)
<i>Mimosa tenuiflora</i>	20,179	(Cássia et al., 2013)

Construcción de dispositivo para elaboración de briquetas. Se construyó una briquetadora para procesar el aserrín y bagazo, obteniendo piezas cilíndricas con un grosor de 4 cm. Se realizó un diseño basado en materiales disponibles obtenidos del centro de acopio en Zamorano. El prototipo elaborado se fundamentó en el modelo de una briqueteadora hidráulica. Se reutilizaron piezas de metal, platino y una gata mecánica para

su fabricación, proyectando la aplicación de niveles de presión que permitieran la densificación de la biomasa seleccionada.

El metal y platino fueron recolectados del centro de acopio, modificando las piezas mediante el uso de sierra para cortar metal y pulidora, para obtener las piezas requeridas para el diseño presentado en la Figura 1. Este modelo se diseñó para elaborar dos briquetas a la vez, mediante tubos verticales con múltiples perforaciones que permitieran la salida del agua durante el proceso de compresión de la biomasa. Se utilizó un taladro para realizar dichas perforaciones en los tubos verticales para las briquetas.

Al verificar que todas las piezas calzaban, se procedió a soldar para fijar las piezas. Se utilizó un tronco de madera como base para realizar la compresión y permitir que el agua de la mezcla saliera por los orificios previamente perforados. Así mismo, para los tubos, se requirió de un molde de lámina de metal con agujeros que tuvieran las mismas dimensiones, facilitando que la mezcla comprimida mantuviera su forma al salir del tubo, obteniendo la briqueta lista para secar.

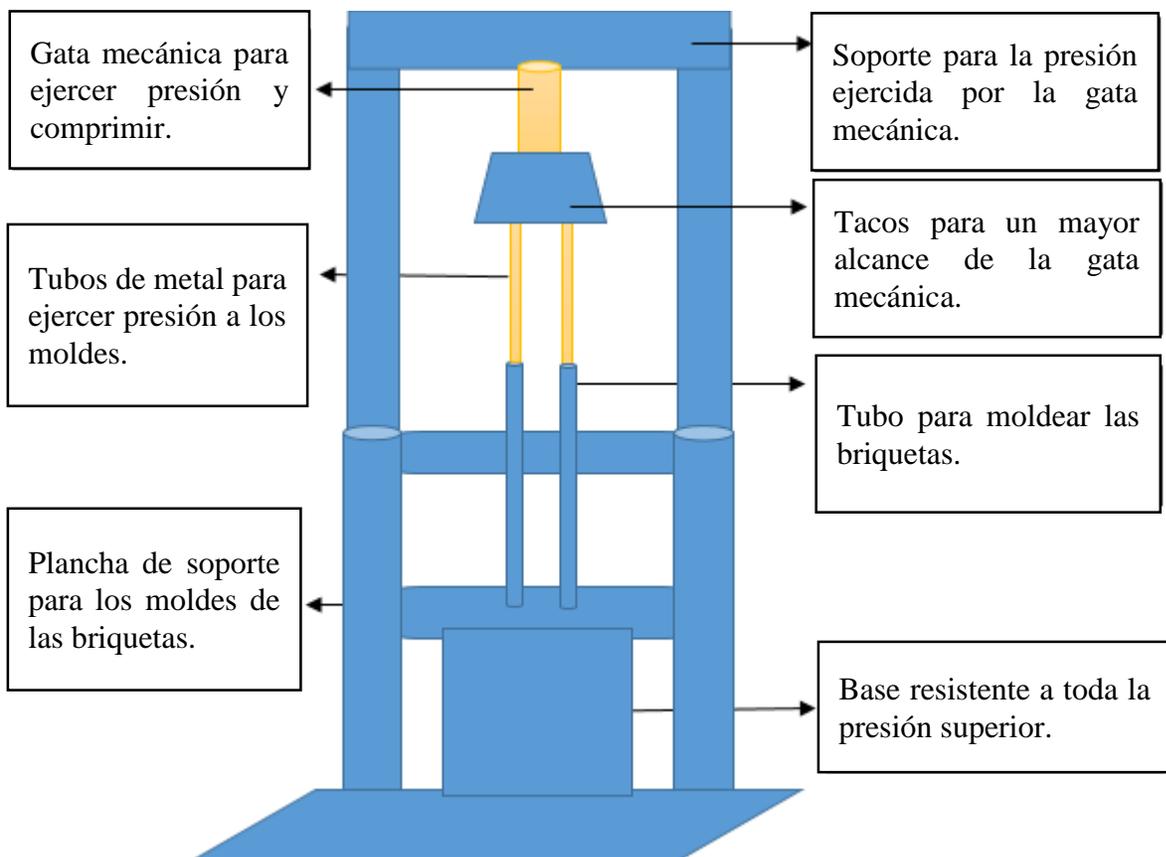


Figura 1. Diseño de briqueadora.

Preparación de combustibles alternativos. Para el caso de las hojas de palma, Se retiraron las hojas del pecíolo y este se cortó en dimensiones de $42 \times 2.5 \times 1.5$ cm. La humedad inicial era superior al 90% por lo cual se secó mediante exposición al sol por espacio de cinco días, utilizando adicionalmente un secador solar ubicado en la Unidad de Ganado Porcino hasta obtener una humedad entre 20%, cada unidad peso 0.052 kg aproximadamente.

Las briquetas de aserrín se realizaron con una mezcla en volumen de 70% aserrín y 30% papel periódico en un balde de 18.90 L útiles. Los pesos de estos fueron de 2.56 kg y 3.75 kg respectivamente. Se le añadió un aglutinante extra al papel, que consistió en 0.04 kg de fécula de maíz disuelta en 1.5 litros de agua. Se mezclaron los ingredientes hasta obtener una masa homogénea y se procedió a usar la briqueteadora para moldear y compactar. El secado de las briquetas fue mediante exposición directa al sol durante cuatro días y tuvieron una humedad promedio del 11%. Las dimensiones de este combustible fueron de aproximadamente $30 \times 4 \times 4$ cm y $15 \times 4 \times 4$ cm. Cada unidad peso alrededor de 0.094 kg.

Las briquetas de bagazo tuvieron una formulación en volumen del 70% bagazo que pesó 0.48 kg y 30% papel periódico húmedo con un peso de 1.26 kg en un recipiente de 12.85 L útiles. Se añadió 0.02 kg de fécula de maíz disuelto en 1 L de agua como aglutinante. Estos ingredientes se mezclaron hasta obtener una masa homogénea. Luego se utilizó la briqueteadora para compactar y moldear la briqueta. Se las colocó en contacto directo al sol hasta obtener una humedad promedio del 12%. Las dimensiones fueron de $29 \times 4 \times 4$ cm y el peso por unidad fue de 0.060 kg, aproximadamente.

Finalmente, la *Mimosa tenuiflora* que se utilizó se extrajo de la Finca Agroecológica de Zamorano, realizando cortes hasta obtener piezas con dimensiones de $30 \times 1.5 \times 1$ cm que facilitarían su manipulación en la cámara de combustión. Posteriormente, se puso a secar durante cuatro días en el sol hasta obtener una humedad promedio del 13%, cada unidad peso alrededor de 0.294 kg.

Se realizaron evaluaciones preliminares con vainas de palma de coco y *Mimosa tenuiflora* hasta llegar a las dimensiones descritas previamente. Inicialmente se comenzó con un tamaño de $40 \times 4 \times 2$ cm para la palma de coco y un tamaño de $55 \times 4 \times 4$ cm para la *Mimosa tenuiflora*. No obstante, durante las pruebas preliminares, los combustibles no lograron mantenerse encendidos hasta alcanzar el punto de ebullición durante el protocolo de ebullición de agua (WBT). En este caso fue necesario disminuir el tamaño, permitiendo mejorar las entradas de oxígeno y mantener la estufa operando hasta culminar la evaluación.

Prueba de ebullición de agua.

La prueba de ebullición de agua (WBT) es un protocolo estandarizado para la evaluación de estufas mejoradas, el cual permite calcular la eficiencia térmica de la estufa, consumo de combustible, consumo energético, tiempo para llegar al punto de ebullición, y emisiones gaseosas. Este protocolo consta de tres fases. Sin embargo, para su adaptación fuera del laboratorio o el desarrollo de evaluaciones preliminares de tecnologías mejoradas, se aplican versiones simplificadas con una sola fase.

Para el registro de los datos generados en la aplicación del protocolo se utiliza el equipo LEMS, por sus siglas en inglés, Laboratory Emissions Monitoring System. La estufa se coloca dentro de una campana recolectora de emisiones, conectada a un canal de dilución con extracción mecánica para recolección del flujo de emisiones, la temperatura y velocidad de salida por la chimenea. Una muestra de los gases generados es caracterizada por medio de sensores, obteniendo la concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y material particulado (PM_{2.5}). Se cuantifican en tiempo real las cantidades totales de contaminantes liberados para conocer las emisiones generadas en el periodo que dura la evaluación (Aprovecho Research Center, 2013).

El equipo cuenta con un sistema gravimétrico que permite recolectar las concentraciones de emisiones de PM_{2.5} liberados durante el tiempo de la evaluación. Para ello es necesario calcular el peso del filtro de fibra de vidrio limpios y sucios para cada repetición de los tratamientos. El peso de los filtros se tomó en base al promedio de cinco valores en la balanza analítica. Cabe mencionar que los filtros obtenidos al finalizar las evaluaciones pasaron por un desecador 24 horas antes de tomarse el peso final.

El segundo objetivo de esta investigación se alcanzó utilizando el protocolo WBT modificado, que consiste en realizar únicamente la primera fase. Se hace uso de dos ollas construidas con plástico resistente al calor de politereftalato de etileno (mylar), para cubrir el 60% de la plancha de la estufa y cada una con 2.5 litros de agua. La temperatura del agua debe estar por debajo de los 25 °C, si esta era mayor, se le agregaba agua helada. La primera olla se utilizó para controlar el tiempo hasta llegar al punto de ebullición (96.1 °C).

Se realizó un registro minucioso de los parámetros controlados antes y después de la prueba de ebullición de agua. Los datos se registraron en el formato WBT modificado, que incluye el nombre del técnico, modelo del ítem de evaluación, ubicación, tipo de combustible, cantidad de leños, nombre de la prueba y fecha de ensayo. Asimismo, temperatura del aire, humedad relativa, tamaño de leña, peso de la primera olla para agua, peso de segunda olla para agua, peso de olla para ceniza, punto de ebullición, factor de calibración, N° de IAP, hora de encendido de IAP, dato del magnehelic y hora de encendido magnehelic.

La humedad de los leños se obtuvo mediante el medidor de humedad y se eligieron al azar tres leños. En cada leño se midieron tres puntos de humedad, hasta obtener nueve valores de humedad del combustible por cada tratamiento. Para obtener el peso neto de la leña utilizada en el ensayo, se pesan los recipientes para leña y astilla/viruta previo a la incorporación de los combustibles. Estos valores se restan al peso neto al inicio y final del protocolo. Además, se registra el tiempo de inicio, el tiempo final y hora en la que el agua llega al punto de ebullición. Finalmente se registra la temperatura inicial y final del agua, el peso de cada olla con agua y el peso de las cenizas y carbón vegetal remanente.

Los datos obtenidos por las evaluaciones con la prueba de ebullición de agua fueron procesados individualmente mediante el Software Version 4.2.3 en la hoja de cálculo Aprovecho Advanced Studies in Appropriate Technology del equipo LEMS. De tal manera se logró conocer las concentraciones de las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y material particulado. Así mismo, consumo de combustible húmedo y carbón vegetal. A partir de estas variables se realizó un balance de energía para conocer la

eficiencia energética y potencial energético no aprovechado de cada combustible (Figura 2). A continuación, se describen las ecuaciones realizadas para el análisis previamente descrito:

El consumo de combustible sin humedad representa el peso neto de combustible que se consumió durante el protocolo de ebullición de agua y no cuantifica la cantidad de combustible que se requirió para eliminar la humedad [1]. A partir de ello se obtuvo la energía inicial que contenía el combustible sin humedad, es decir, la energía que entró en la estufa HM-4000 [2]. Sin embargo, no toda la energía que entró en el sistema se liberó porque parte de esta quedó contenida en el carbón vegetal remanente del combustible, denominándola como energía sin liberar [3].

$$a = (B) - (B \times u) \quad [1]$$

$$C = (a \times PCI) \quad [2]$$

$$D = (e \times PCI) \quad [3]$$

Donde:

a: Consumo de combustible sin humedad (kg)

B: Consumo de combustible húmedo (kg)

u: Humedad del combustible (%)

C: Energía inicial (kJ)

PCI: Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

D: Energía sin liberar (kJ)

e: Carbón vegetal remanente (kg)

El consumo de combustible seco no cuantificó el combustible utilizado para eliminar la humedad, ni el carbón vegetal remanente porque es combustible que no se quemó [4]. En base a ello, al multiplicar el consumo de combustible seco con el poder calorífico respectivo se obtuvo la cantidad de energía que contenía el combustible seco [5]. La energía liberada por el combustible seco se conoció al restar de la energía del combustible seco la energía sin liberar [6]. La velocidad de transferencia de energía se midió mediante la razón de la energía liberada por el combustible seco y el tiempo que duró la prueba de ebullición de agua [7].

$$A = (a - e) \quad [4]$$

$$U = (A \times PCI) \quad [5]$$

$$E = (U - D) \quad [6]$$

$$V = (E/t) \quad [7]$$

Donde:

A: Consumo de combustible seco sin carbón vegetal (kg)

U= Energía del combustible seco (kJ)

E: Energía liberada por el combustible seco (kJ)
V: Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)
t: Tiempo

La energía entregada para hervir el agua se calculó al multiplicar la cantidad del agua con la cual se realizó la evaluación, el calor específico del agua y la diferencia entre la temperatura inicial y final [9]. Así mismo, a partir de la multiplicación de la cantidad de agua evaporada y la entalpía del agua se midió la energía entregada para evaporar el agua [10]. La suma de la energía entregada para hervir y evaporar el agua estableció el valor del total de energía entregada a las ollas [11].

$$Q = (m \times C_e \times \Delta T) \quad [9]$$

$$M = Y \times H \quad [10]$$

$$i = (Q + M) \quad [11]$$

Donde:

Q: Energía entregada para hervir el agua (kJ)
m: Cantidad de agua (kg)
C_e: Calor específico del agua (4.186 kJ/kg*°C)
ΔT : Diferencia entre temperatura inicial y final (°C)
M: Energía entregada para evaporar el agua (kJ)
Y: Cantidad de agua evaporada (kg)
H: Entalpía del agua (2260 kJ/kg)
i: Total de energía entregada a las ollas (kJ)

La eficiencia energética se calculó mediante la razón del total de energía entregada a las ollas y la energía inicial que entró en la tecnología [12]. La energía que no se utilizó para hervir y evaporar el agua son pérdidas energéticas. Se midió el porcentaje de energía perdida en el carbón vegetal remanente a través de la razón de la energía sin liberar y la energía inicial [13]. Además, se determinó el potencial de energía liberada no aprovechada que es la energía liberada que no fue entregada a las ollas [14].

$$EF = (i / C \times 100) \quad [12]$$

$$Z = (D/C \times 100) \quad [13]$$

$$X = ((E - i) / E \times 100) \quad [14]$$

Donde:

EF: Eficiencia energética (%)
Z: Porcentaje de energía perdida en el carbón vegetal remanente (%)
X: Potencial de energía liberada no aprovechado (%)

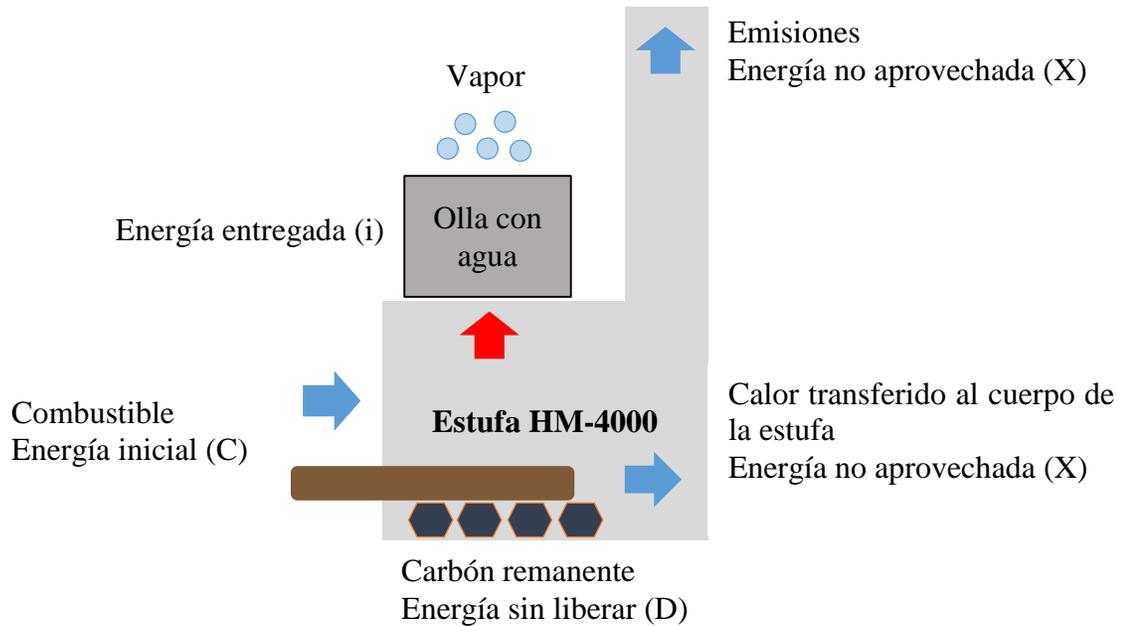


Figura 2. Gráfico del balance de energía.

Evaluación de combustibles alternativos.

Se realizaron tres repeticiones por combustible para generar resultados representativos de la tecnología con un coeficiente de variación menor al 25%. Los combustibles alternos utilizados para operar la estufa mejorada se encendieron utilizando astilla y viruta de pino. Las piezas de combustible fueron ubicadas manteniendo una distancia de 1 cm entre ellas para un apropiado flujo de aire dentro de la cámara de combustión. Se iniciaron las pruebas con leña para establecer la línea base del desempeño. La cámara de combustión fue operada con cuatro leños a la vez, con una separación aproximada de 1 cm entre ellos. Las puntas de los leños se van quebrando a medida estos se convierten en carbón vegetal.

El segundo combustible evaluado fue la palma de coco. Se utilizó 0.062 kg de astilla/viruta para iniciar el fuego. La cámara de combustión se mantuvo encendida con seis unidades de vainas a la vez. El tercer combustible fueron las briquetas de aserrín y se encendió con un aproximado de 0.058 kg de astilla/viruta. La cámara de combustión se mantuvo con dos unidades a la vez. El cuarto combustible utilizado fueron las briquetas de bagazo y se encendió con 0.060 kg de astilla/viruta. Asimismo, se manipuló la cámara de combustión con dos unidades a la vez. El último combustible implementado fue la *Mimosa tenuiflora* y se utilizaron ocho unidades a la vez. Se utilizaron 0.082 kg de astilla/viruta para su ignición.

Análisis estadístico.

Los datos obtenidos en el Laboratorio del Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas se evaluaron mediante análisis estadístico descriptivo, incluyendo promedios y coeficiente de varianza. Se utilizó el programa “Statistical Package for the Social Science” (SPSS versión 19.0) para aplicar los análisis estadísticos cuantitativos. Se aplicó el test de Shapiro Wilk para determinar si los datos se comportan con normalidad. Posteriormente se emplearon métodos

paramétricos para evaluar la eficiencia energética y emisiones generadas al operar la estufa con diferentes combustibles. La prueba ANDEVA de un factor, determinó si había varianza significativa entre los combustibles. Posterior a ello, se empleó la prueba de comparación múltiple Duncan para identificar los combustibles más óptimos como alternativa al uso de leña de pino. Se representó el comportamiento de los combustibles mediante un gráfico de cajas. Finalmente, se aplicó el análisis de correlación lineal de Pearson para medir el grado de relación entre: la humedad y el consumo de combustible húmedo, el consumo de combustible seco y la energía liberada, el consumo de combustible seco y el poder calorífico, el poder calorífico y la energía liberada y el consumo de combustible húmedo y las emisiones contaminantes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección y preparación de combustibles alternativos.

La briqueteadora construida permitió elaborar briquetas con dimensiones apropiadas para la cámara de combustión del modelo HM-4000. Gamarra (2010) intento utilizar briquetas para evaluar las estufas mejoradas Eco Fogón y Justa 2×3 . Las pruebas no funcionaron porque las briquetas en este experimento no se adecuaron a las dimensiones de las cámaras de combustión de estas estufas, permitiendo el uso de una briqueta a la vez. Esto representó un obstáculo para la combustión y el mantenimiento del proceso. También, hace mención que combustibles como briquetas únicamente funcionan al utilizar más de dos unidades en la cámara de combustión. Cabe recalcar que las dimensiones de estas briquetas fueron de mayor diámetro y menor longitud que las utilizadas en este proyecto. En este experimento se utilizaron dos unidades de briquetas que se adecuaban a la cámara de combustión de la estufa HM-4000, logrando mantener las condiciones apropiadas a lo largo del protocolo y sus repeticiones.



Figura 3. Briqueteadora construida con materiales reciclados.

Determinación de combustible testigo.

En la prueba de ebullición de agua con el modelo HM-4000 se consumieron 574.67 g de pino con un 11% de humedad. El consumo de pino seco fue de 509.14 que contenían 9926.69 kJ. La energía liberada en la combustión fue de 9299.49 kJ y los otros 627.20 kJ sin liberar se mantuvieron en los 21.33 g de carbón vegetal remanente. La velocidad de transferencia energética fue de 245.29 kJ/min. La energía entregada a la olla para hervir y evaporar el agua fue de 2219.08 kJ. Acorde a ello, se determinó al pino con una eficiencia energética del 24% como se puede observar en el Cuadro 2.

Los procesos de conversión de energía generan emisiones por la reacción de oxidación del combustible. Al operar la estufa HM-4000 con pino se emitieron 837.46 g de dióxido de carbono durante toda la evaluación. Además, se emitieron 12 g de monóxido de carbono y 1060.24 mg de material particulado. Estas se generan mediante una combustión incompleta por falta de oxígeno (Fuentes, 2015). Las variaciones entre las repeticiones del experimento en cada parámetro estuvieron por debajo del 25%.

Cuadro 2. Resumen de pruebas de ebullición de agua con pino

Variables	Pino	
	Promedio	C.V (%)
Consumo de combustible húmedo (g)	574.67	3
Consumo de combustible seco (g)	509.14	3
Humedad (%)	10.00	7
Energía inicial (kJ)	9926.69	3
Carbón vegetal remanente (g)	21.33	11
Energía sin liberar (kJ)	627.20	11
Energía liberada (kJ)	9299.49	4
Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	245.29	20
Total de energía entregada (kJ)	2219.08	3
Eficiencia energética (%)	24.00	1
Energía no entregada (kJ)	7080.41	4
Emisiones dióxido de carbono (g)	837.46	7
Emisiones monóxido de carbono (g)	12.17	1
Emisiones de material particulado (PM _{2.5}) (mg)	1060.24	15

C.V: Coeficiente de variación.

Evaluación de la eficiencia energética y emisiones generadas por el modelo HM-4000 utilizando combustibles sólidos alternativos frente al combustible testigo.

La prueba de normalidad Shapiro Wilk reflejó que tanto las variables presentadas para determinar eficiencia energética como aquellas de emisiones tuvieron un nivel de significancia mayor a 0.05. Lo cual indicó que todas las variables tenían una distribución normal. La prueba paramétrica ANDEVA de un factor ($p < 0.05$) mostró que hubo diferencia significativa en la eficiencia energética de los combustibles al operar estufa HM-4000. En anexos se encuentra adjuntado a detalle los datos utilizados en el balance de

energía y los resultados estadísticos. A continuación, los Cuadros 3 y 4 representan los valores promedios en las variables de cada combustible evaluado con el protocolo WBT.

Cuadro 3. Resumen de pruebas de ebullición de agua con palma de coco y aserrín.

Variables	Palma de coco		Aserrín	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
Consumo de combustible húmedo (g)	874.67	7	484.00	9
Consumo de combustible seco (g)	586.15	7	378.16	10
Humedad (%)	20.27	8	10.70	5
Energía inicial (kJ)	12479.93	7	6058.70	8
Carbón vegetal remanente (g)	72.00	22	26.00	20
Energía sin liberar (kJ)	2116.80	22	764.40	20
Energía liberada (kJ)	10363.13	7	5294.30	10
Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	238.26	5	208.29	17
Total de energía entregada (kJ)	2850.15	8	1818.21	10
Eficiencia energética (%)	0.27	4	0.34	2
Energía no entregada (kJ)	7512.98	7	3476.08	10
Emisiones dióxido de carbono (g)	1083.08	16	713.26	14
Emisiones monóxido de carbono (g)	35.27	21	8.13	6
Emisiones de material particulado (PM _{2.5}) (mg)	3407.54	28	765.55	9

C.V: Coeficiente de variación.

Cuadro 4. Resumen de pruebas de ebullición de agua con bagazo y *Mimosa tenuiflora*.

Variables	Bagazo		<i>Mimosa tenuiflora</i>	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
Consumo de combustible húmedo (g)	374.00	4	482.00	12
Consumo de combustible seco (g)	299.47	6	352.36	11
Humedad (%)	11.63	7	12.87	4
Energía inicial (kJ)	5439.46	4	7919.16	11
Carbón vegetal remanente (g)	17.33	35	43.33	35
Energía sin liberar (kJ)	509.60	35	1274.00	35
Energía liberada (kJ)	4929.86	10	6645.16	11
Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	297.08	11	325.45	17
Total de energía entregada (kJ)	1434.95	9	1600.89	11
Eficiencia energética (%)	0.29	3	0.24	1
Energía no entregada a las ollas (kJ)	3494.91	5	5044.27	10
Emisiones dióxido de carbono (g)	555.67	1	646.98	19
Emisiones monóxido de carbono (g)	6.22	10	9.25	24
Emisiones de material particulado (PM _{2.5}) (mg)	509.39	14	684.88	28

C.V: Coeficiente de variación.

Se consideró el consumo de combustible húmedo para conocer el peso neto utilizado en las pruebas de ebullición de agua. Este combustible incluye el porcentaje mínimo de humedad que se alcanzó durante su preparación. Acorde este parámetro, se conoció un consumo de este recurso cercano a la realidad de las comunidades rurales, ya que alcanzar menores porcentajes de humedad requiere mayor tiempo y equipo especializado.

En el gráfico de cajas (Figura 4) se muestra el comportamiento de los combustibles alternativos y el pino. En el Cuadro 5, se observa que el consumo de palma de coco húmeda fue mayor que el consumo de pino húmedo. Entre el consumo de *Mimosa tenuiflora* y briquetas de aserrín no hubo diferencia significativa, pero ambos combustibles mostraron tener ventaja ante el pino ya que se utilizó una menor cantidad de estos. Entre los combustibles alternativos, las briquetas de bagazo presentaron menor consumo en húmedo en contraste del pino. En la Figura 5 se observa una fuerte correlación entre la humedad y el consumo de combustible húmedo ($R^2 = 0.797$). Es decir, que entre más humedad contenía un combustible mayor era su consumo de combustible húmedo.

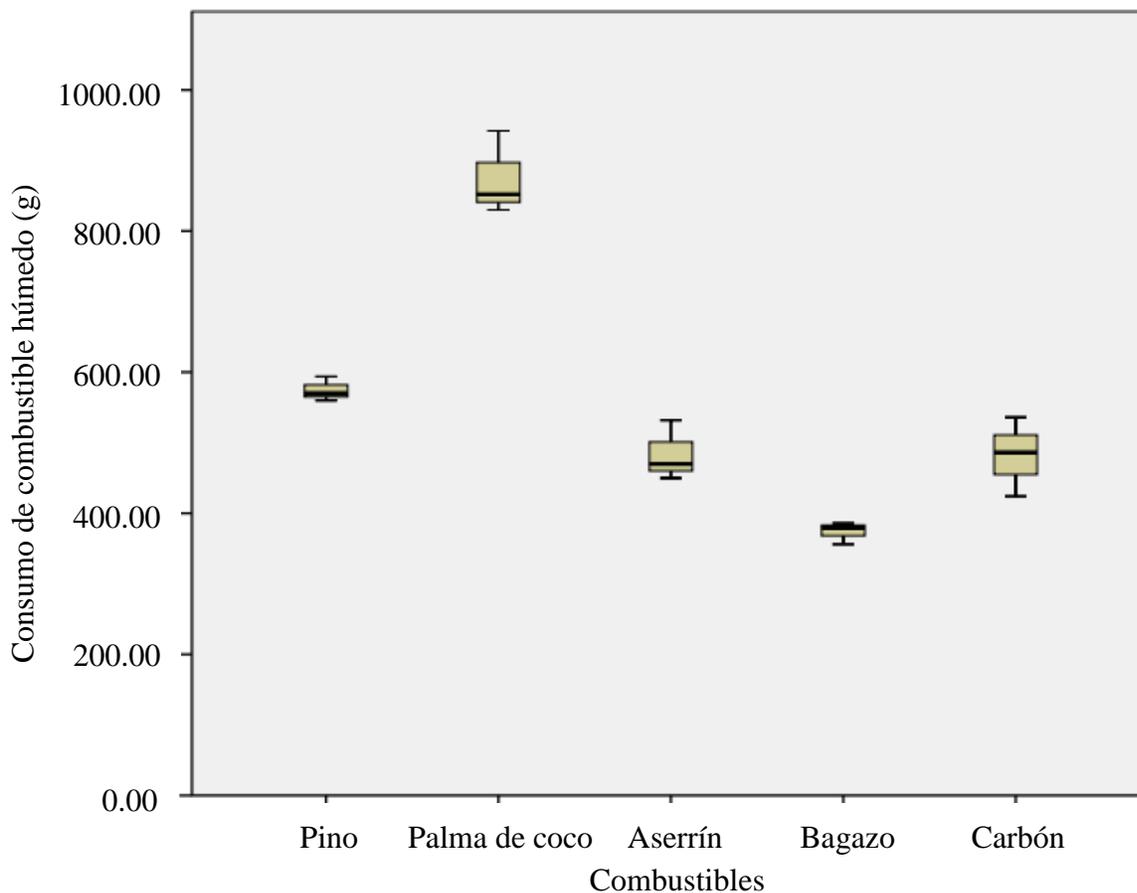


Figura 4. Gráfico de cajas del consumo de combustible húmedo.

Cuadro 5. Consumo de combustible húmedo (g) mediante prueba Duncan.

Combustibles	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
Bagazo	3	374.00			
<i>Mimosa Tenuiflora</i>	3		482.00		
Aserrín	3		484.00		
<i>Pinus oocarpa</i>	3			574.67	
Palma de coco	3				874.67
Significancia		1.00	0.96	1.00	1.00

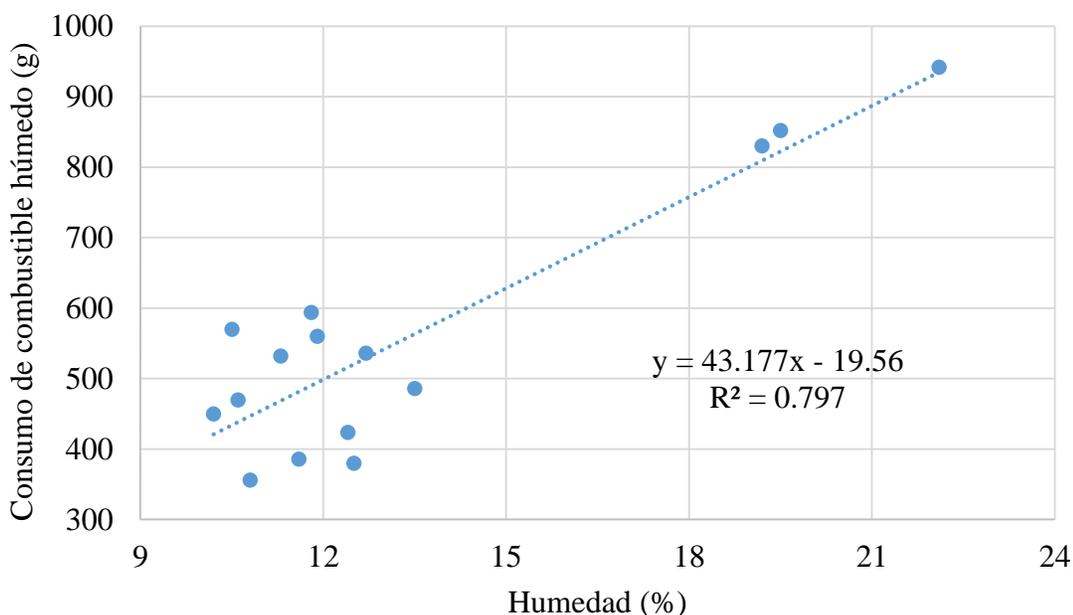


Figura 5. Diagrama de dispersión de humedad y consumo de combustible húmedo.

El consumo de combustible seco permitió realizar una comparación representativa y equitativa entre los combustibles alternativos y el pino, ya que no cuantifica el combustible consumido para eliminar la humedad que estos contenían. Se representó gráficamente los diferentes consumos de combustible seco (Figura 6). Acorde a la confiabilidad de la prueba Duncan (Cuadro 6), se determinó que, en contraste a la operación de la estufa con pino, los picos más altos en consumo de combustible seco se dieron al operar con palma de coco. Las briquetas de aserrín y la *Mimosa tenuiflora* se consumieron en cantidades significativamente menores al pino. Entre los combustibles alternativos evaluados las briquetas de bagazo presentaron el menor consumo de combustible seco en comparación al pino.

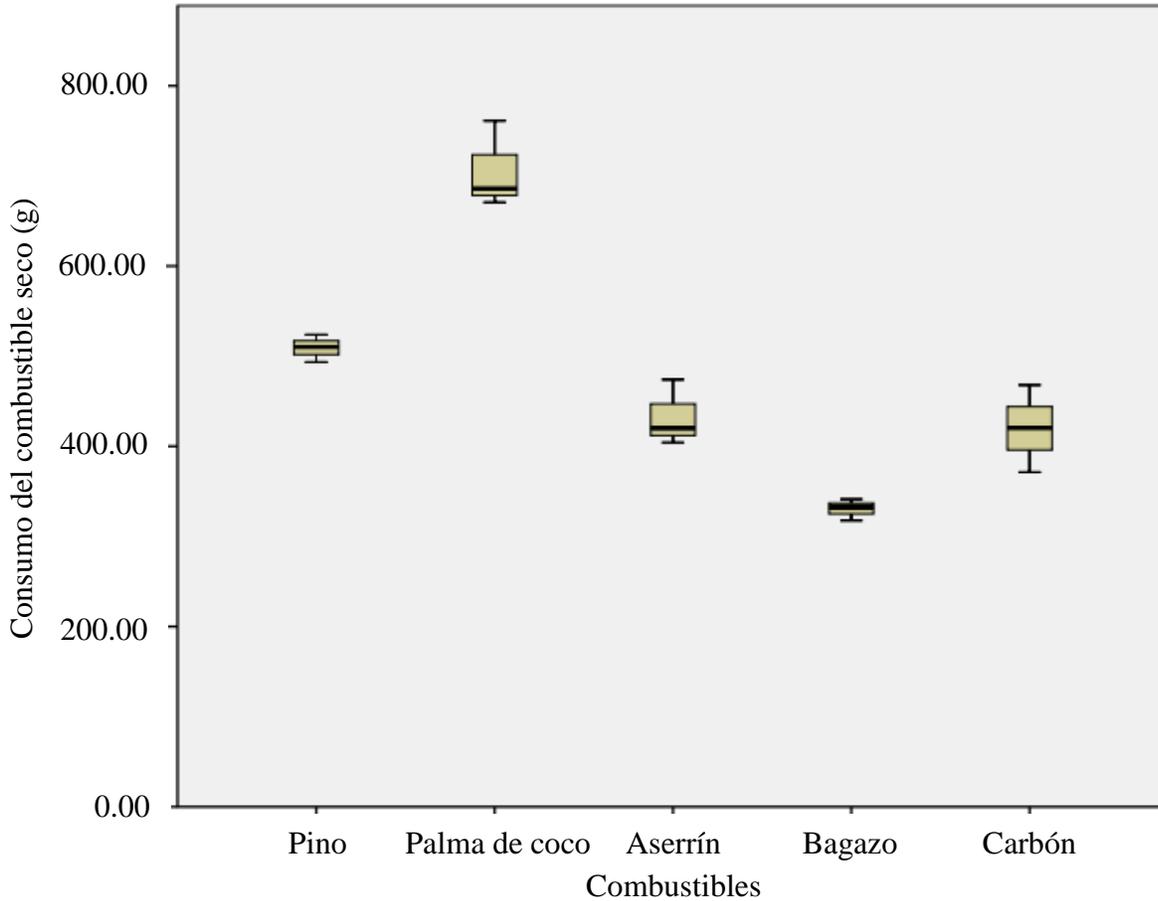


Figura 6. Gráfico de cajas del consumo de combustible seco.

Cuadro 6. Prueba Duncan en el consumo de combustible seco (g).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Bagazo	3	330.43			
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3		419.91		
Aserrín	3		432.76		
<i>Pinus oocarpa</i>	3			509.14	
Palma de coco	3				705.88
Significancia		1.00	0.67	1.00	1.00

La energía inicial contenida en el combustible seco es la energía que ingresa en el sistema, (estufa HM-4000). La energía de entrada al realizar el protocolo WBT con *Mimosa tenuiflora*, briquetas de bagazo y aserrín fue significativamente menor que con pino. Caso contrario a los resultados obtenidos con palma de coco que fue el combustible que ingresó más energía al sistema, como se puede observar en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Prueba Duncan en la energía inicial (kJ).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Bagazo	3	5439.46			
Aserrín	3	6058.70			
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3		7919.16		
<i>Pinus oocarpa</i>	3			9926.69	
Palma de coco	3				12479.93
Significancia		0.25	1.00	1.00	1.00

Le energía liberada está directamente asociada a la cantidad de combustible que se consumió, restando la cantidad de carbón vegetal remanente en la cámara de combustión al concluir la prueba de ebullición de agua. No se cuantifica la energía contenida en el carbón vegetal porque es energía sin liberar. En el Cuadro 8, la prueba Duncan muestra que la palma de coco fue el único combustible que liberó más energía que el pino. La *Mimosa tenuiflora*, las briquetas de aserrín y bagazo fueron los combustibles que liberaron la menor cantidad de energía en comparación al pino. En la Figura 7, determinó que sí hubo una correlación entre el consumo de combustible seco y la energía liberada ($R^2 = 0.814$). Por lo cual, el combustible seco que se consumió en mayor cantidad fue el que liberó más energía.

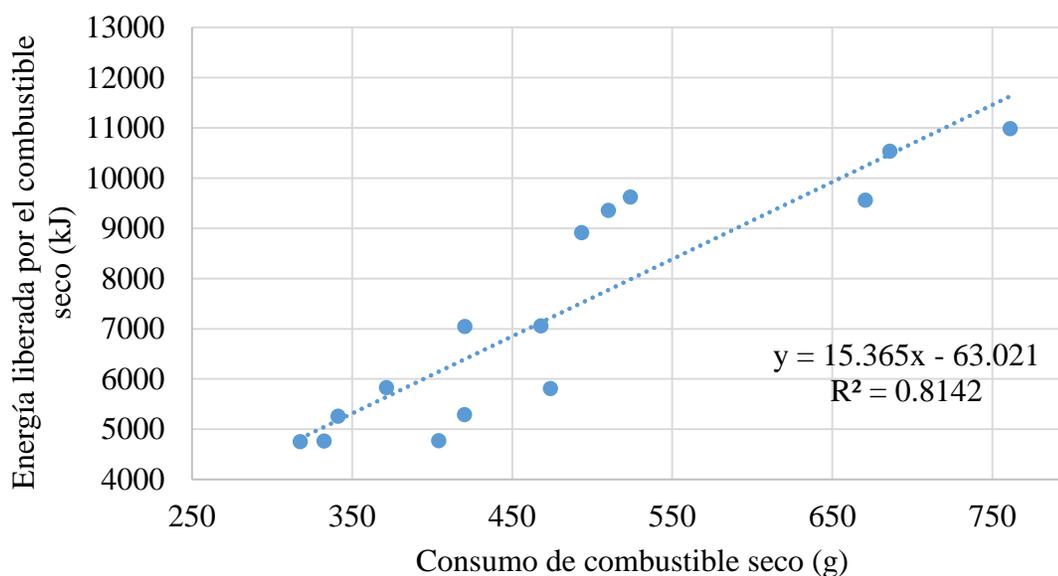


Figura 7. Diagrama de dispersión del consumo de combustible seco y la energía liberada por el combustible seco.

Cuadro 8. Prueba Duncan de la energía liberada (kJ).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Bagazo	3	4929.86			
Aserrín	3	5294.30			
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3		6645.16		
<i>Pinus oocarpa</i>	3			9299.49	
Palma de coco	3				10363.13
Significancia		0.43	1.00	1.00	1.00

La velocidad de transferencia de energía representa la rapidez con la cual se liberó la energía durante el proceso de combustión (Figura 8). En el Cuadro 9, la prueba Duncan evidencia que la velocidad de transferencia de energía del pino fue estadísticamente igual que la de palma de coco, bagazo y aserrín. Sin embargo, numéricamente las briquetas de aserrín presentaron la menor velocidad de transferencia de energía y esto permitió que la tecnología asimilara mejor el calor liberado. Así mismo, utilizando briquetas se produjo menos carbón vegetal en la cámara de combustión, indicando que se aprovechó prácticamente todo su potencial energético y se requirió consumir menos cantidad del mismo para cumplir el mismo objetivo. Por otro lado, la *Mimosa tenuiflora* se quemó con mayor rapidez que el pino y los otros combustibles alternos.

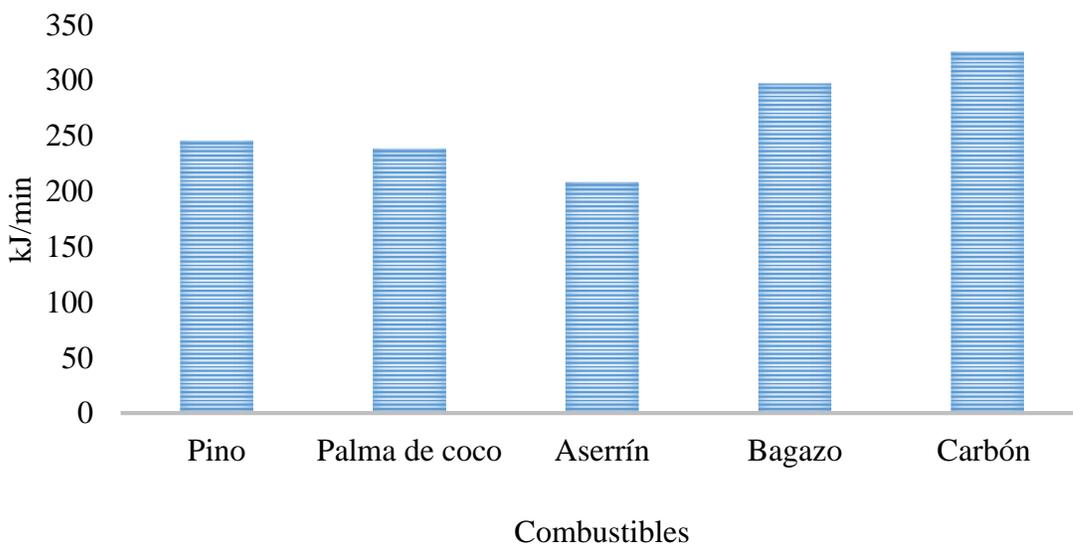


Figura 8. Gráfico de barras de la velocidad de transferencia de energía.

Cuadro 9. Prueba Duncan en la velocidad de transferencia de energía (kJ/min).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Aserrín	3	208.29		
Palma de coco	3	238.26	238.26	
<i>Pinus oocarpa</i>	3	245.29	245.29	
Bagazo	3		297.08	297.08
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3			325.45
Significancia		0.30	0.11	0.40

El balance de energía nos indica que no toda la energía liberada se aprovecha, sino que solo la fracción entregada a las ollas para hervir y evaporar el agua. Al utilizar la misma cantidad de agua en todas las evaluaciones, en teoría la cantidad de energía requerida para hervir agua es teóricamente la misma, no obstante, la diferencia en la eficiencia energética de los combustibles se encuentra asociada a la química de combustión, la velocidad de transferencia de energía y las pequeñas variaciones de la temperatura inicial del agua entre las evaluaciones (Figura 9).

Acorde al Cuadro 10, se entregó más energía a las ollas al operar la estufa con palma de coco que con pino. En cambio, con aserrín y la *Mimosa tenuiflora* las ollas utilizaron estadísticamente menos energía en comparación con el pino. Sin embargo, fue el bagazo el combustible con el cual las ollas utilizaron la menor cantidad de energía para llevar el agua al punto de ebullición.

Cuadro 10. Prueba Duncan del total de energía entregada (kJ).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Bagazo	3	1434.95			
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3	1600.89	1600.89		
Aserrín	3		1818.22		
<i>Pinus oocarpa</i>	3			2219.08	
Palma de coco	3				2850.15
Significancia		0.24	0.14	1.00	1.00

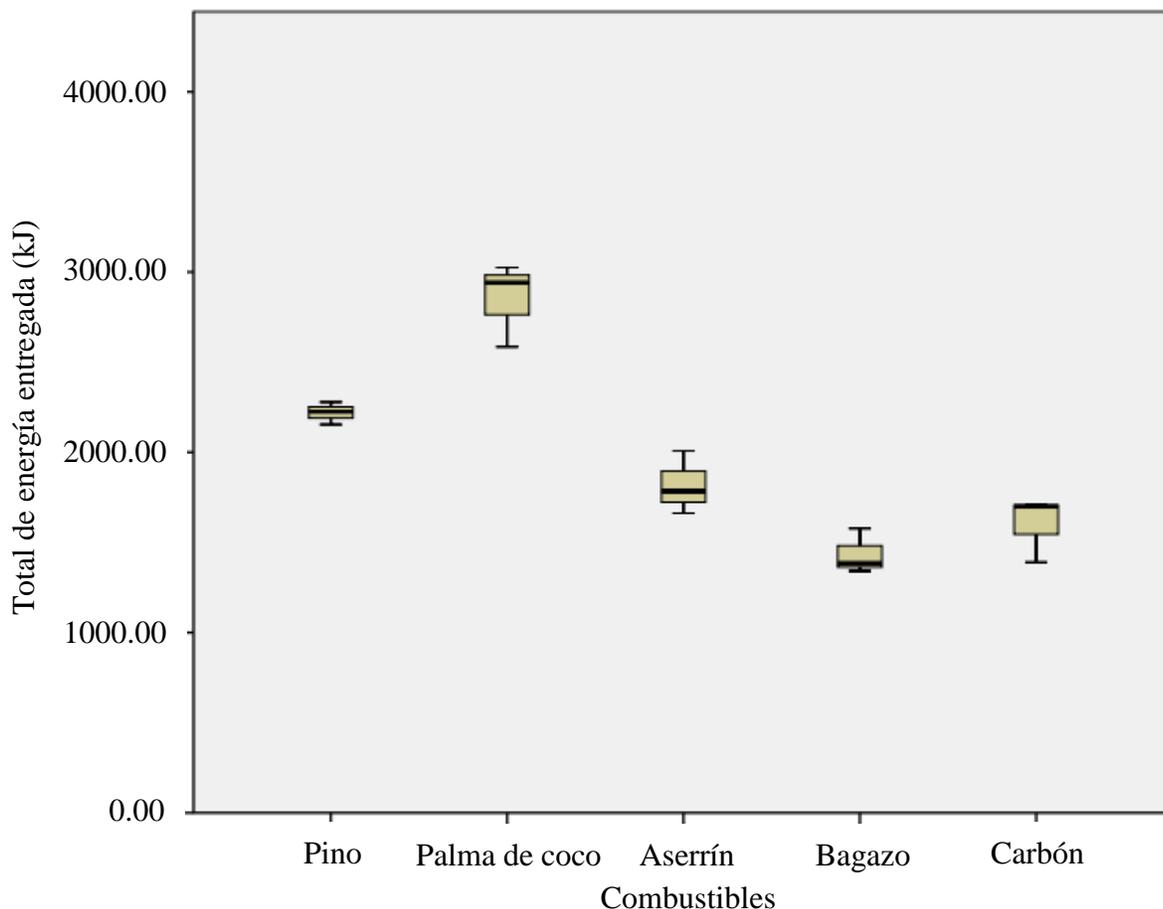


Figura 9. Gráfico de cajas del total de energía entregada a las ollas.

La eficiencia energética es la razón de la energía entregada a las ollas para alcanzar el punto de ebullición y la cantidad de energía inicial del combustible. El resto de energía se consideran pérdidas contenidas en el carbón vegetal, emisiones y por conducción en paredes de la tecnología. En base al Cuadro 11, se identificó que el 30% de la energía liberada por las briquetas de aserrín realmente se transfirió a las ollas, siendo este combustible el de mayor eficiencia energética. Las briquetas de bagazo (26%) fueron estadísticamente más eficientes que el pino (22%). Sin embargo, el pino no mostró diferencia significativa con la eficiencia energética de la palma de coco (23%) ni con la de *Mimosa tenuiflora* (20%). En la Figura 10 se representó gráficamente la eficiencia energética de los combustibles.

Cuadro 11. Prueba Duncan de la eficiencia energética (%).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3	0.20			
<i>Pinus oocarpa</i>	3	0.22	0.22		
Palma de coco	3		0.23		
Bagazo	3			0.26	
Aserrín	3				0.30
Significancia		0.06	0.31	1.00	1.00

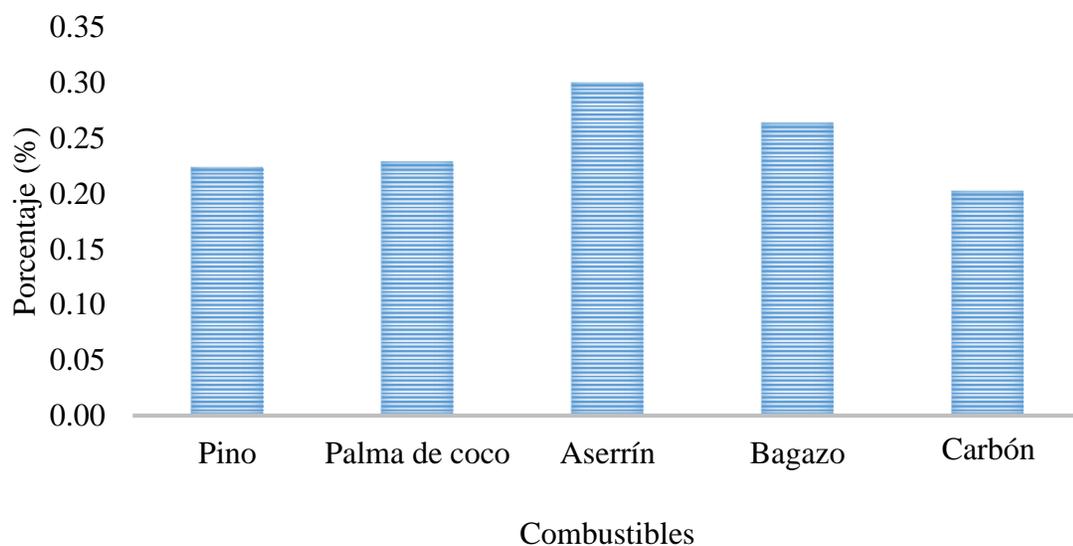


Figura 10. Gráfico de barras de la eficiencia energética de los combustibles.

En la Figura 11, la correlación del poder calorífico y el consumo de combustible seco fue débil ($R^2 = 0.071$). Es decir, que el poder calorífico de los combustibles no influyó en la cantidad de combustible consumido. Además, en la Figura 12 tampoco se identificó una correlación entre el poder calorífico y la energía liberada por el combustible seco ($R^2 = 0.399$). Por lo tanto, la eficiencia energética de un combustible está sujeta a otros factores como la velocidad de transferencia de energía, pérdidas registradas durante el balance energético y la generación de carbón vegetal.

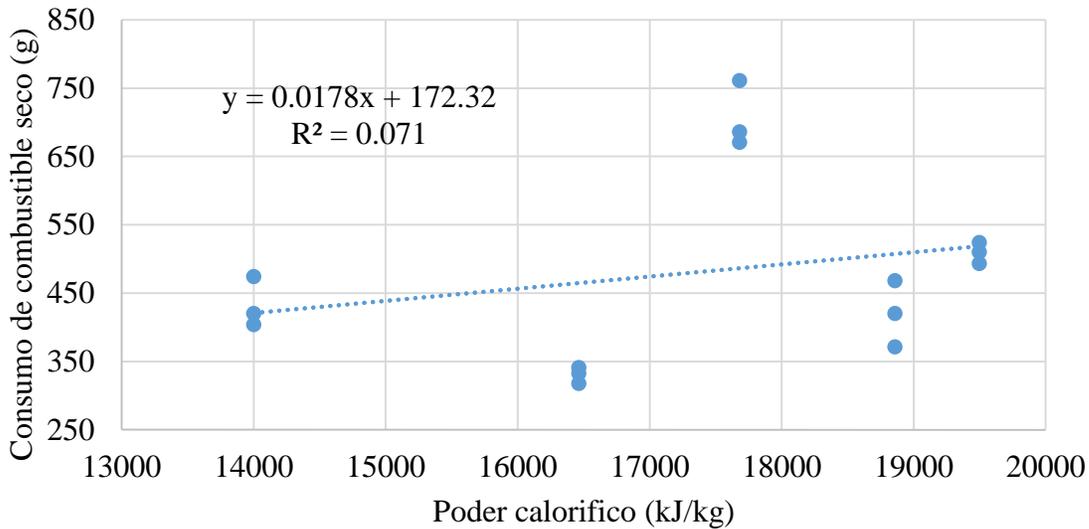


Figura 11. Diagrama de dispersión del poder calorífico y el consumo de combustible seco.

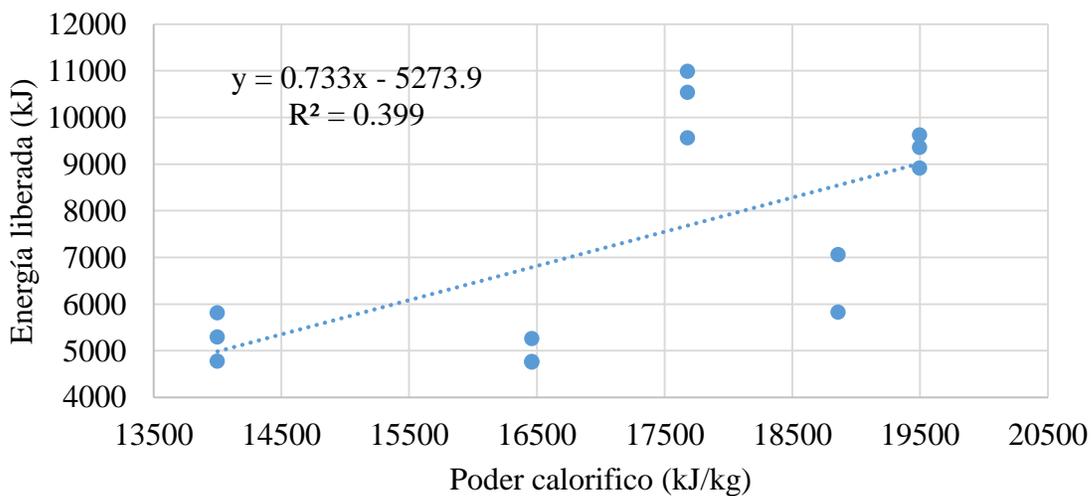


Figura 12. Diagrama de dispersión de la energía entregada del combustible seco y poder calorífico.

Parte de la biomasa que entró en la estufa no completó el proceso de combustión y permanece dentro de la cámara de combustión en forma sólida, carbón vegetal. En la Figura 13 se representó la cantidad de carbón vegetal al finalizar las pruebas de ebullición de agua con los diferentes combustibles evaluados. En el Cuadro 12, la prueba Duncan determinó que en comparación al pino fue la palma de coco el combustible que generó más carbón vegetal remanente. Esto es congruente con el alto consumo de palma de coco, principalmente por su alto contenido de humedad.

La *Mimosa tenuiflora* genero más carbón vegetal en contraste al pino, aunque fueron cantidades significativamente menores a la palma de coco. En cambio, la cantidad de carbón vegetal remanente al utilizar briquetas de aserrín y bagazo fue estadísticamente igual al pino. Los combustibles con más carbón vegetal remanente tuvieron un menor aprovechamiento energético porque está energía no se entregó. En el Cuadro 13, se representó el porcentaje de pérdida energética por carbón vegetal remanente, el cual se calculó mediante la razón de la energía sin liberar y la energía inicial.

La palma de coco se quemó a menor velocidad que el pino, lo cual favoreció en su eficiencia energética. Sin embargo, el 17% de la energía que entró de la palma de coco se quedó en la estufa en forma de carbón vegetal, siendo el combustible de mayor consumo y por ende más energía potencial. En contraste al pino, que únicamente el 6% de la energía que entró a la estufa se mantuvo como carbón vegetal remanente. Igualmente, la *Mimosa tenuiflora* no liberó el 16% de su energía inicial, lo cual fue un factor determinante en su eficiencia energética. Las briquetas de aserrín aun al no haber liberado el 13% de su energía inicial, fue el combustible que más lento transfirió su energía y por ello fue más eficaz. Finalmente, el 9% de la energía inicial de las briquetas de bagazo se contuvo en forma de carbón vegetal.

Cuadro 12. Prueba Duncan en carbón vegetal remanente (g).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Bagazo	3	17.33		
<i>Pinus oocarpa</i>	3	21.33		
Aserrín	3	26.00	26.00	
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3		43.33	
Palma de coco	3			72.00
Significancia		0.36	0.07	1.00

Cuadro 13. Perdida energética por carbón vegetal (%).

Combustibles	Perdida energética por carbón vegetal (%)
<i>Pinus oocarpa</i>	6
Palma de coco	17
Aserrín	13
Bagazo	9
<i>Mimosa tenuiflora</i>	16

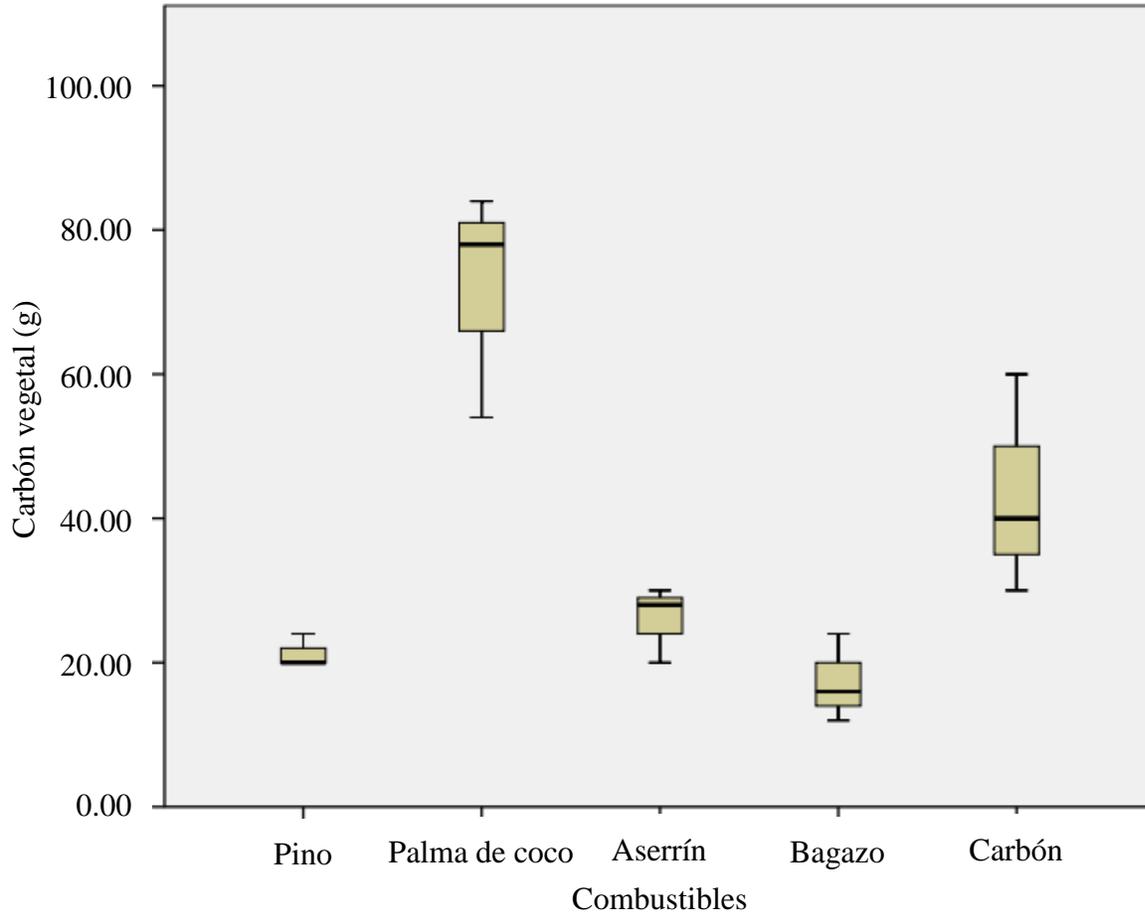


Figura 13. Gráfico de cajas del carbón vegetal remanente.

En la Figura 14, se representó gráficamente la fracción no aprovechado de la energía liberada, es decir, la energía que se perdió en emisiones y calentamiento de la infraestructura de la estufa. La prueba Duncan representada en el Cuadro 14 determinó que el pino perdió estadísticamente la misma proporción de energía que la *Mimosa tenuiflora*. La palma de coco y las briquetas de bagazo tuvieron un potencial energético no aprovechado significativamente menor al pino y las briquetas de aserrín fueron más eficientes.

El aprovechamiento energético de un combustible está relacionado a la rapidez con la cual se quemó. Los combustibles que se quemaron más rápido generaron más emisiones y por ende liberaron más energía. El calor contenido en las emisiones fue el que calentó la plancha en su movimiento dentro de la estufa. Por lo tanto, el incremento en la velocidad de transferencia de energía equivale a que las emisiones salgan más rápido de la estufa, sin transferir el calor contenido en estas.

Cuadro 14. Prueba Duncan del potencial energético liberado no aprovechado (%).

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Aserrín	3	0.65			
Bagazo	3		0.71		
Palma de coco	3			0.72	
<i>Pinus oocarpa</i>	3				0.76
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3				0.76
Significancia		1.00	1.00	1.00	1.00

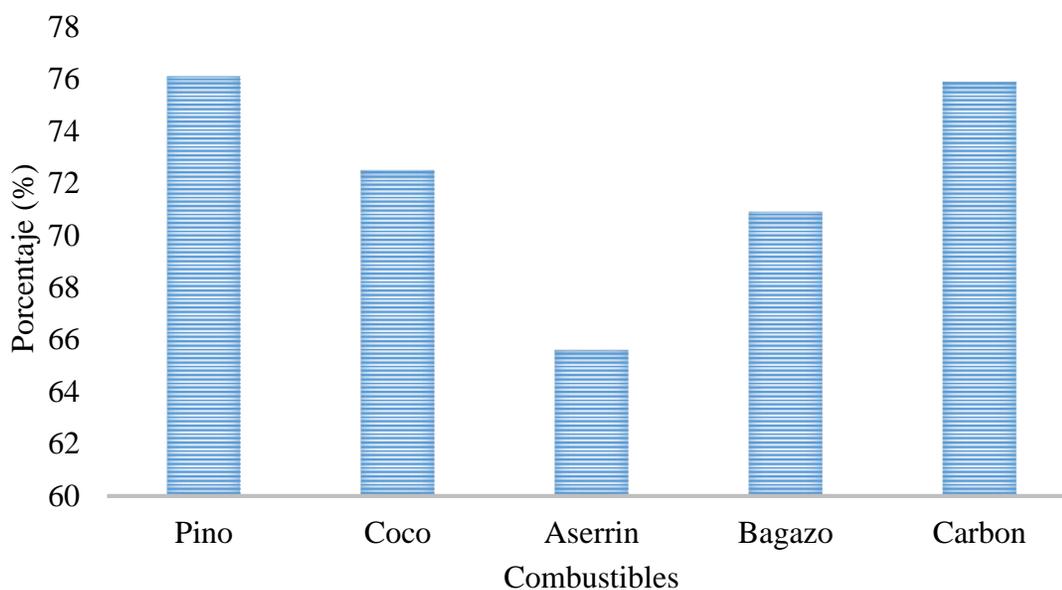


Figura 14. Gráfico de barras del potencial energético no entregado.

En la Figura 15, se representó gráficamente las variaciones que hubo en las emisiones de dióxido de carbono de los combustibles evaluados. En relación al pino, fue la palma de coco el combustible que generó más emisiones de dióxido de carbono, lo cual se asocia a que tenía mayor contenido de humedad que los demás combustibles. Las briquetas de aserrín y la *Mimosa tenuiflora* emitieron estadísticamente la misma cantidad de CO₂ que el pino. Sin embargo, el combustible que generó estadísticamente menores emisiones en contraste al pino fue el bagazo (555.67 g) como se puede observar en el Cuadro 15. La correlación representada en la Figura 16, muestra que el consumo de combustible húmedo influyó en las emisiones de dióxido de carbono ($R^2 = 0.808$). La cantidad de dióxido de carbono emitido fue proporcional al consumo de combustible húmedo y este se rigió acorde a la humedad que contenía la biomasa.

Cuadro 15. Prueba Duncan en las emisiones de dióxido de carbono (g).

Combustibles	N	Subconjunto		
		1	2	3
Bagazo	3	555.67		
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3	647.00	647.00	
Aserrín	3	713.33	713.33	
<i>Pinus oocarpa</i>	3		837.33	
Palma de coco	3			1083.00
Significancia		0.12	0.07	1.00

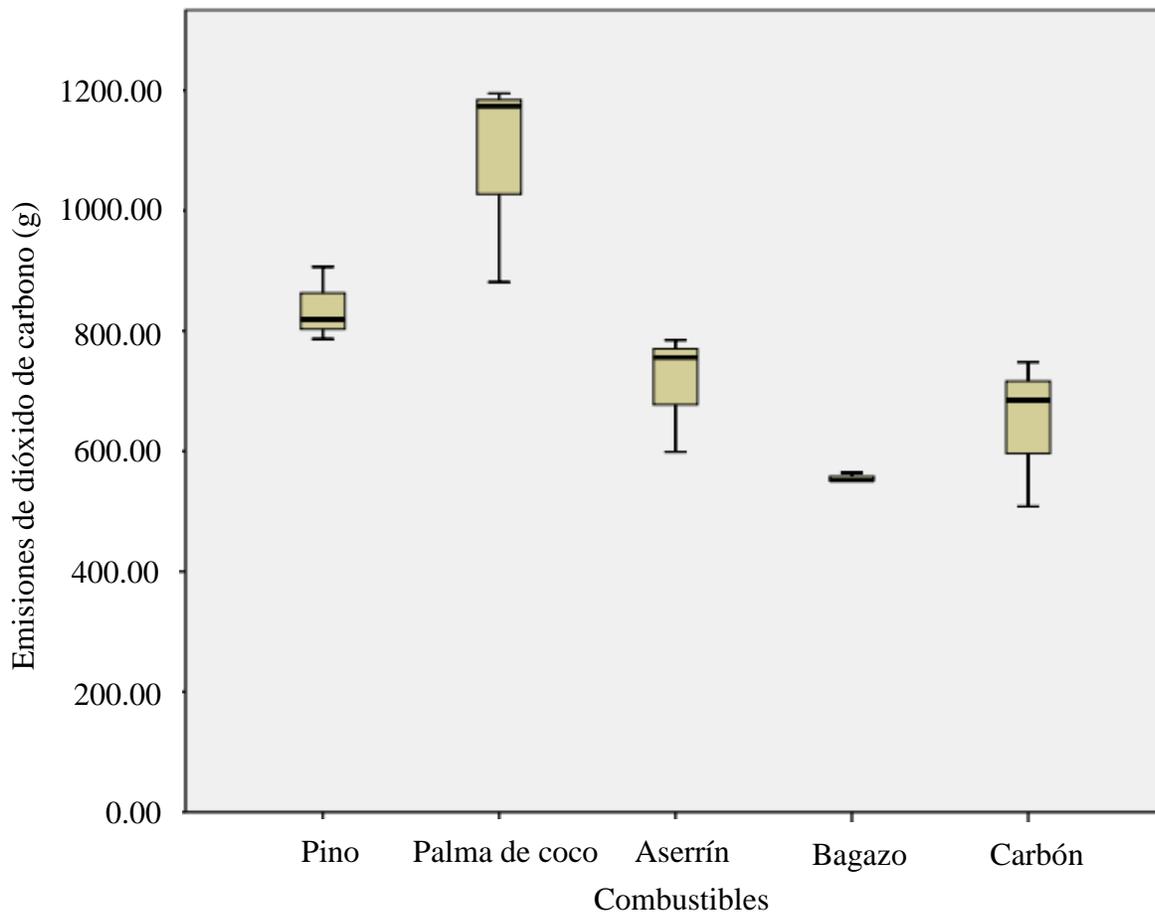


Figura 15. Gráfico de cajas de emisiones de dióxido de carbono de los combustibles alternativos.

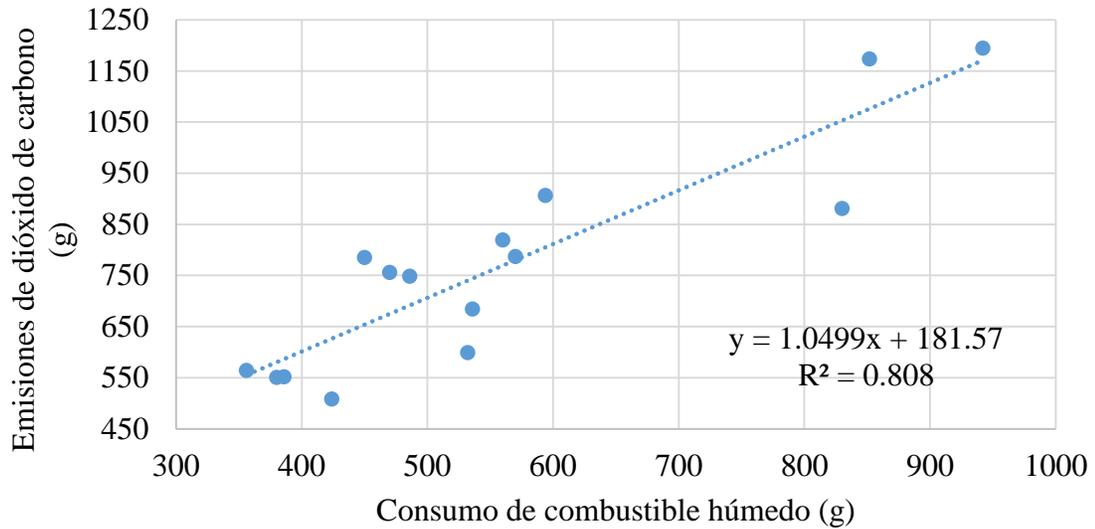


Figura 16. Diagrama de dispersión de las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible húmedo.

Las Figuras 17 y 19 representan la generación de emisiones de monóxido de carbono y material particulado de los combustibles, respectivamente. Según la confiabilidad de la prueba Duncan en los Cuadros 16 y 17, la cantidad de emisiones contaminantes emitidas en la combustión del pino fueron estadísticamente iguales que las de aserrín, bagazo y *Mimosa tenuiflora*. La palma de coco generó las mayores emisiones en contraste a los otros combustibles y también fue el que produjo mayor carbón vegetal.

El carbón vegetal es indicador de pirolisis porque el oxígeno disponible en la cámara de combustión no fue suficiente para permitir una combustión completa. Esta condición influyó en la cantidad de carbón vegetal remanente. En la Figura 18, muestra que hubo una correlación significativa entre el consumo de combustible húmedo y las emisiones de monóxido de carbono ($R^2 = 0.922$). Así mismo, en la Figura 19 se representó la correlación entre el consumo de combustible húmedo y las emisiones de $PM_{2.5}$ ($R^2 = 0.862$), lo cual indicó que a medida aumentaba el consumo de combustible húmedo se generaban más emisiones.

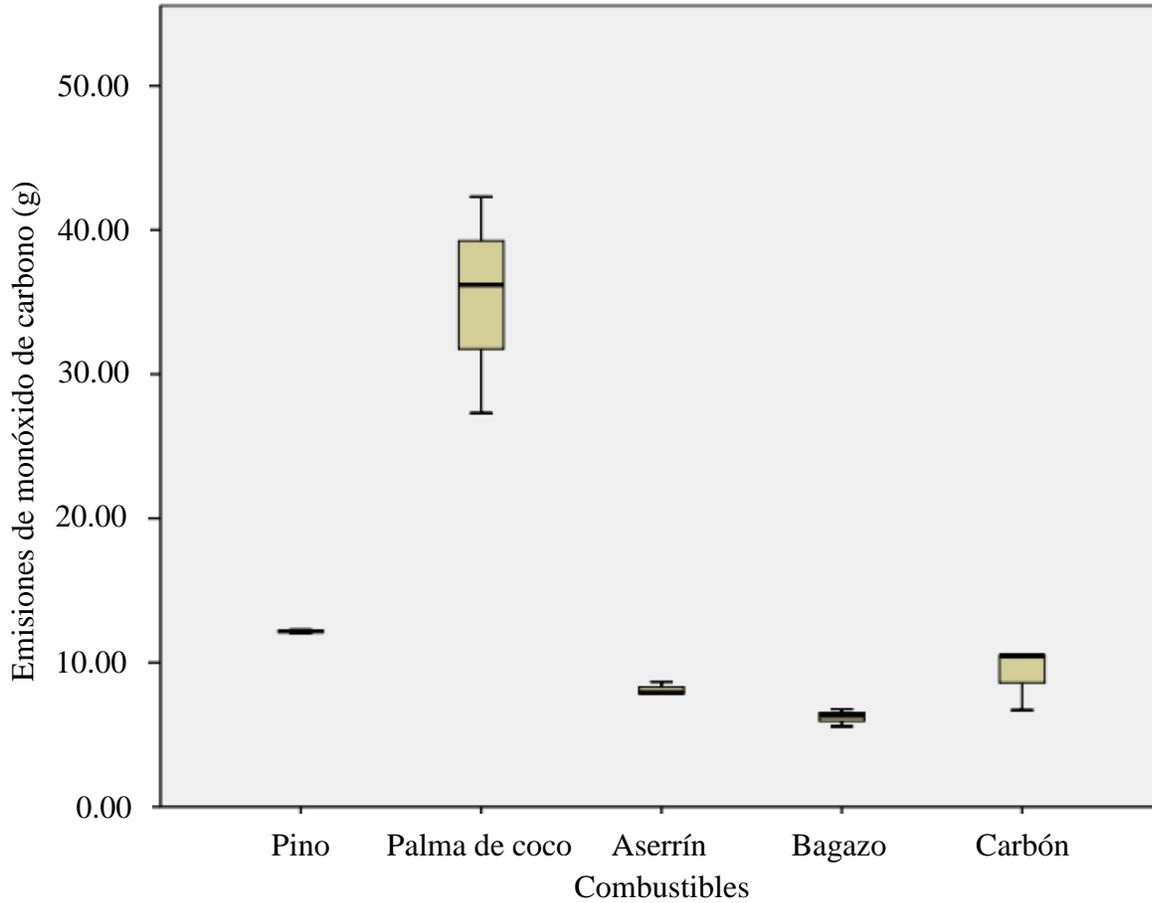


Figura 17. Gráfico de cajas de las emisiones de monóxido de los combustibles alternativos.

Cuadro 16. Prueba Duncan en emisiones de monóxido de carbono (g).

Combustibles	N	Subconjunto	
		1	2
Bagazo	3	6.22	
Aserrín	3	8.13	
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3	9.24	
<i>Pinus oocarpa</i>	3	12.17	
Palma de coco	3		35.27
Significancia		0.08	1.00

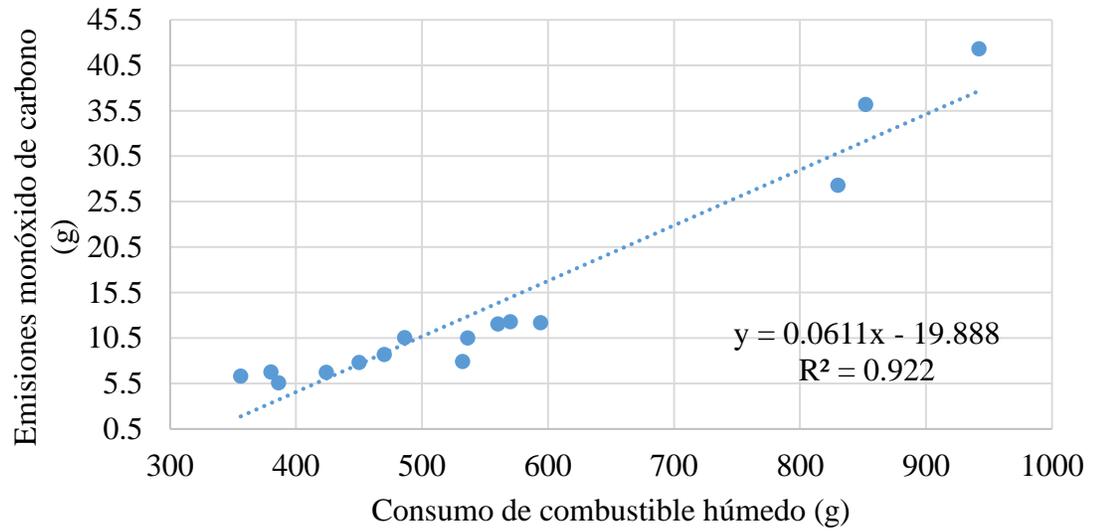


Figura 18. Diagrama de dispersión de las emisiones de monóxido carbono y consumo de combustible húmedo.

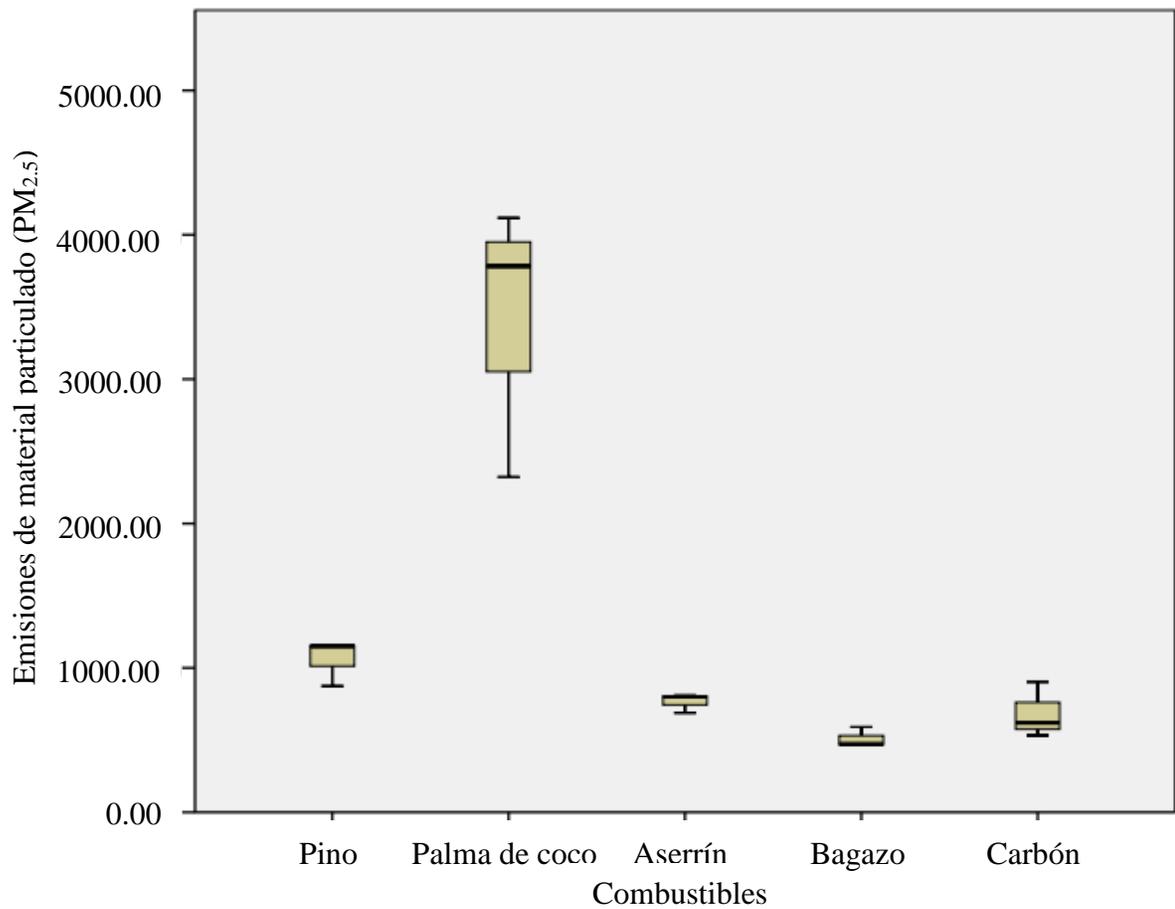


Figura 19. Gráfico de cajas de las emisiones de material particulado de los combustibles alternativos.

Cuadro 17. Prueba Duncan en emisiones de material particulado (PM_{2.5}).

Combustibles	N	Subconjunto	
		1	2
Bagazo	3	509.33	
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3	684.67	
Aserrín	3	765.67	
<i>Pinus oocarpa</i>	3	1060.33	
Palma de coco	3		3407.67
Significancia		0.19	1.00

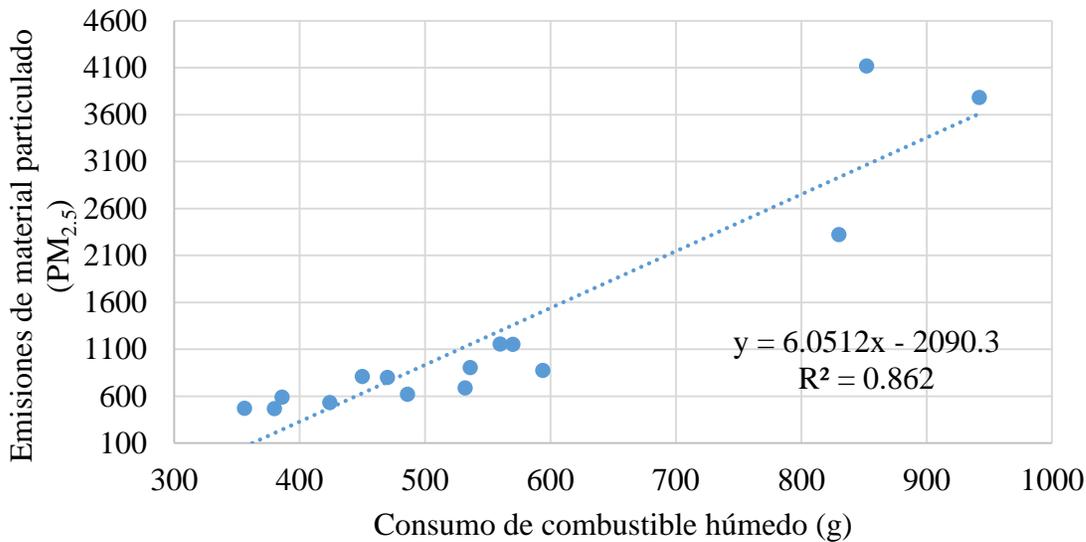


Figura 20. Diagrama de dispersión de las emisiones de material particulado y consumo de combustible húmedo.

El combustible que generó menos emisiones contaminantes y tuvo mayor eficiencia energética fueron las briquetas de aserrín. La energía liberada por este combustible fue utilizada por la olla en mayor proporción para hervir y evaporar el agua, por lo que se aprovechó más su potencial energético. Las emisiones generadas por el pino fueron mayores que las de aserrín, bagazo y *Mimosa tenuiflora*. Sin embargo, estadísticamente estas no tuvieron diferencia significativa entre sí. La palma de coco no es una alternativa viable la leña de pino, aunque la eficiencia energética de estos combustibles es estadísticamente igual, las emisiones contaminantes de la palma de coco son mayores.

Juneman y Legarreta (2007), mencionan que la eficiencia de los combustibles está sujeta a la cantidad del mismo que se requiera para transmitir determinado nivel de calor. La mejor opción entre los combustibles alternativos evaluados son las briquetas de aserrín. No obstante, las briquetas de bagazo y la *Mimosa tenuiflora* podrían considerarse como alternativas viables al haber disponibilidad de la biomasa. El potencial energético no entregado de estos combustibles se debió a su rápida combustión, pero aun así tienen

ventaja ante el pino en eficiencia y generación de emisiones contaminantes. Sin embargo, se debe considerar que el pino se usa tradicionalmente y esto ha ocasionado la preferencia de los usuarios hacia este combustible. La *Mimosa tenuiflora*, podría ser propicio para disminuir el uso de pino en la zona sur de Honduras que es el territorio en donde predomina.

Las evaluaciones realizadas mostraron que las dimensiones de los combustibles son un factor clave en su eficiencia energética. Fredes (2014), realizó un análisis comparativo del uso de diferentes combustibles maderables como leña, aserrín, briquetas y pellets con similares poderes caloríficos. El aserrín sin densificar tuvo la menor eficiencia energética, los resultados con leña fueron similares al de las briquetas y pellets, pero estos últimos fueron más eficientes. En comparación con el presente estudio, Fredes obtuvo resultados en los cuales los combustibles con mayor humedad también generaron más emisiones y cenizas.

Lograr la adopción de briquetas como combustible alternativo a la leña en las zonas rurales está sujeto a la vía de obtención del mismo. Es decir, que es necesario contar con tiempo para elaborar todos los procesos de densificación de la biomasa, si estas se elaboraran en los hogares. Otra alternativa para su obtención, probablemente la más viable, es la distribución de combustibles densificados a partir de microempresas locales dedicadas a este rubro.

4. CONCLUSIONES

- Las condiciones óptimas de operación de la estufa HM-4000 no se registraron al utilizar leña de pino. La dinámica de la combustión de este recurso derivó en una eficiencia energética inferior a la obtenida con las briquetas de aserrín y bagazo. Esta condición se encuentra asociada a una elevada velocidad de transferencia de energía y un menor porcentaje de aprovechamiento del potencial calorífico del recurso.
- La humedad del combustible en conjunto con la eficiencia energética resultaron ser las variables que afectaron de forma negativa el desempeño de la estufa, incrementando las emisiones totales, la concentración de contaminantes en las emisiones y el consumo del recurso energético.
- Los resultados obtenidos al utilizar las briquetas de aserrín, denotan que este recurso representa la mejor alternativa para operar la estufa HM-4000, presentando una eficiencia energética superior a la leña de pino y demás combustibles evaluados. Por otro lado, el aprovechamiento energético del pino y Mimosa tenuiflora no presentó diferencias estadísticas. Esta característica, sumada a su disponibilidad en regiones de baja precipitación, hace de la leña de Mimosa tenuiflora un potencial sustituto al pino y otras especies comúnmente utilizadas.
- La palma de coco no representa una alternativa apropiada como sustituto a la leña porque genera mayores emisiones de CO₂, CO y PM_{2.5}. Aunque la eficiencia energética de ambos combustibles es similar, la palma de coco requiere de un proceso de secado prolongado y de preferencia una reducción del tamaño de los leños utilizados en la cámara de combustión.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la mejora del diseño de la cámara de combustión que permita un mayor ingreso de aire contribuirá en la mejora de los procesos de combustión. Dando como resultado un mayor aprovechamiento de la energía liberada por los combustibles, disminuyendo la energía no aprovechada que se concentra en el carbón vegetal. Esto derivará en mejores resultados para la variable de eficiencia energética.
- El uso de estufas mejoradas proporciona diferentes beneficios, como la mejora de la calidad del aire en los hogares y la reducción del consumo de combustible, sin embargo, es una tecnología que continuará demandando leña como recurso energético. Los programas de difusión de estufas mejoradas deberían enfocarse en la introducción de combustibles alternativos que puedan operarse en los diseños mejorados de la cámara de combustión y así contribuir en el alcance de los objetivos propios de la difusión de esta tecnología.
- Seleccionar combustibles que sean fácil de remover su porcentaje de humedad. Los combustibles evaluados deben tener humedades similares para que este factor no influya en los resultados.
- La industrialización del proceso de fabricación de briquetas con dimensiones apropiadas para su aplicación en estufas mejoradas puede representar una alternativa de mercado con mayores beneficios ambientales y sociales que los registrados hasta la fecha con la leña. El desarrollo de un estudio de mercado permitirá identificar su potencial de introducción como un combustible alternativo en el sector rural y periurbano.

6. LITERATURA CITADA

- Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J. y Torres, A. (2010). Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. *Revista CET*, 24, pp.2–62.
- Alvis Guzmán, N. y De la Hoz Restrepo, F. (s.f). Humo de biocombustible y enfermedades respiratorias: Indoor Air Pollution. Recuperado de: <http://www.fundacionpromigas.org.co/es/Biblioteca/Investigaciones/Inv002.pdf>
- Aprovecho Research Center (2013). Instructions for use of the laboratory emissions monitoring system (LEMS). Oregon, Estados Unidos.
- Benitez, D. M. (2016). Composición florística de árboles de la finca agroecológica de Zamorano (Tesis de pregrado), Escuela Agrícola Panamericana, Valle del Yegua, Honduras.
- Brañas, M. M. (2015). Los techos de hoja de palmera. Iquitos, Peru: Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Recuperado de: https://books.google.hn/books?id=yYW7BwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Bryden, M., Still, D., Scott, P., Hoffa, G., Ogle, D., Bailis, R. y Goyer, K. (2006). Principios de diseño para estufas de cocción con leña. Aprovecho Research Center, Shell Foundation y Partnership for Clean Indoor Air. Estados Unidos. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/42538611/Spanish-Design-Principles-07-10-06>
- Cabezas, R. I. (2009). Diseño de un sistema de compactación de biomasa de cascarilla de arroz y serrín, en la producción de bloques sólidos combustibles (Tesis de grado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Camargo-Ricalde, S. L. (2000). Descripción, distribución, anatomía, composición química y usos de *Mimosa tenuiflora* (Fabaceae-Mimosoideae) en México. *Revista de Biología Tropical*, 48 (4), pp. 939–954.
- Cássia, A., Cavalcante, R., Oliveira, R., Neves, A., Santos, P., Moura, E. y Nogueira, I. (2013). Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do seridó, Rio Grande Do Norte. *Revista árvore*, 37(6), pp. 1153–1163.

- Castillo, D. (2005). Evaluación de la situación actual de las variedades resistentes a la enfermedad del amarillamiento letal del cocotero (ALC) en Atlantida y Colón, Honduras (Tesis de pregrado), Escuela Agrícola Panamericana, Valle del Yeguaré, Honduras.
- Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras. (2008). Inventario de 16 residuos industriales para Honduras: Hacia la Gestión Integral de los Residuos Sólidos. San Pedro Sula, Honduras: Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras.
- Energieonderzoek Centrum Nederland. (2002). Pine sawdust briquettes. Petten, Nederland. Recuperado de [https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#pine sawdust briquettes](https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#pine_sawdust_briquettes)
- Envirofit Smarter Living. (2016). Envirofit and honduran government to partner on major cookstove impact study. Recuperado de: <http://envirofit.org/envirofit-and-honduran-government-partner-on-major-cookstove-impact-study/>
- Espinasa, R., Balza, L., Hinestrosa, C., Sucre, C. y Anaya, F. (2017). Dossier Energético. Honduras: Banco Interamericano de Desarrollo. Honduras.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1993). Energy and environment basics: bangkok, regional wood energy development program (RWEDP).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2008). Estufa mejorada que reduce el consumo de leña. Recuperado de: <http://teca.fao.org/es/read/3641>
- Flores, W. C. (2010). El sector energético de Honduras: Diagnóstico y política. Research gate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Wilfredo_Flores4/publication/264880697_El_sector_energetico_de_Honduras_Diagnostico_y_politica_energetica/links/55f8839508aec948c47fedb7.pdf
- Fredes, Nuñezm, N. A. (2014). Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustibles sólidos a partir de biomasa forestal en la región de Los Lagos (Tesis de pregrado), Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Fuentes, A. (2015). Herramienta para el cálculo de la combustión en generadores térmicos: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Tesis de grado), Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, España.

- Fundación para el Desarrollo Integral de Honduras. (2013). Ecofogón portátil “El Ahorrador”. Recuperado de <http://fundeih.org/proyectos/ecofogon-portatil>
- Gamarra, L. A. (2010). Fabricación y evaluación de eficiencia y emisiones de briquetas a base de residuos agrícolas como alternativa energética al uso de leña (Tesis de pregrado), Escuela Agrícola Panamericana, Valle del Yeguaré, Honduras.
- Germann, D. y Westhoff, B. (1995). Estufas en imágenes: Una documentación sobre las estufas mejoradas y tradicionales de África, Asia y América Latina. Fráncfort del Meno, Alemania: Brandes y Apsel.
- Global Alliance For Clean Cookstoves. (2016). Guatemala: Clean cooking can help. Global Alliance For Clean Cookstoves. Recuperado de: <https://cleancookstoves.org/research-and-evaluation/technology-and-fuels/>
- Global Alliance For Clean Cookstoves (2013). Guía para el desarrollo de índices de adopción e impacto. Global Alliance For Clean Cookstoves. Recuperado de: http://cleancookstoves.org/resources_files/guia-para-adopcion-indices.pdf
- Harker, A., Sandels, A. y Burley, J. (1982). Calorific values for wood and bark and a bibliography for fuelwood. Reino Unido: Tropical Products Institute.
- Instituto Nacional de Estadística. (2013). Honduras. Recuperado de: http://www2.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&task=doc_view&Itemid=270&gid=33595&lang=es
- Juneman, A. y Legarreta, G. (2007). Inhalación de humo de leña: una causa relevante pero poco reconocida de enfermedad pulmonar obstructiva crónica. *Revista Argentina de Medicina Respiratoria*, 7(2), pp. 51–57.
- Lopez, M., Mongilardi, N. y Checkley, W. (2014). Enfermedad pulmonar obstructiva crónica por exposición al humo de biomasa. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(1), pp. 94–99.
- Ludeña, C. E., Salomon, M., Cocco, M., Dannecker, C., Grütter, J. y Zelaya, S. (2015). Identificación y priorización de “acciones nacionales apropiadas de mitigación (NAMA) en los sectores de agricultura, transporte y eco-fogones en Honduras. Washington, Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Martínez, A. L. (2015). Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, desechos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando

almidón y cal como aglutinantes (Tesis de pregrado), Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Mendieta, D. R. M. (2016). Potencialidad del sector forestal como facilitador del desarrollo humano sostenible. *Revista Perspectivas del Desarrollo*, 3(3), pp. 42–59.

Ortíz, L., Tejada, A., Vázquez, A., & Veiras, G. P. (2004). Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. *Revista CIS-Madera*, 10, pp. 17–32.

Rico, E., Martínez, M. y Estebané, V. (2013). ¿Por qué es importante la salud ambiental?. *Calcu/Economía*, 1(51).

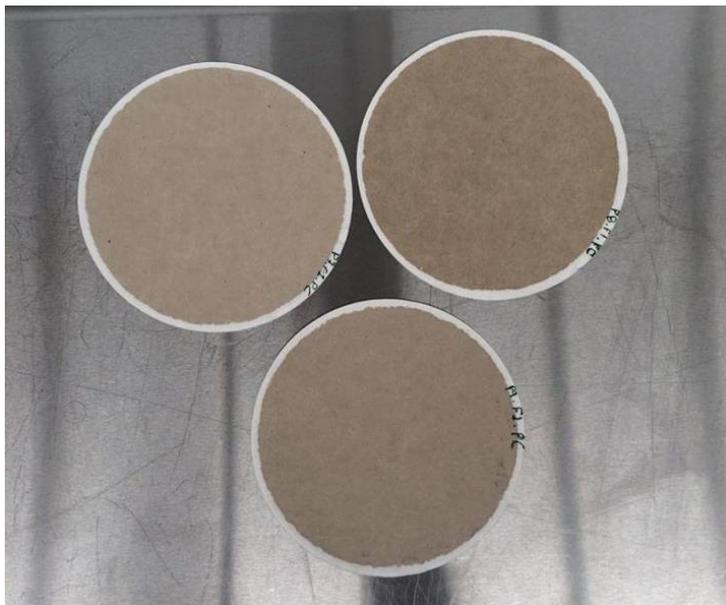
Soares, D. (2006). Mujeres, agua, leña y desarrollo: estudio de caso sobre género y recursos naturales en los Altos de Chiapas. *Gestión y cultura del agua*, 2, pp. 293–312.

Triana-Hernández, O., León-Martínez, T. S., Céspedes-Vázquez, M. I., & Cámara-Pérez, A. (2014). Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel. *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 48(1), pp. 65–70.

Yanchapaxi Trávez, G. S. (2015). Análisis del consumo de leña en doce comunidades de los municipios de Catacamas, La Esperanza, Marcala y Yuscarán, Honduras (Tesis de pregrado), Escuela Agrícola Panamericana, Valle del Yegurare, Honduras.

7. ANEXOS

Anexo 1. Foto de filtros sucios del WBT modificado al operar la estufa con vainas de palma de coco.



Anexo 2. Leños de pino en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.



Anexo 3. Palma de coco en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.



Anexo 4. Briquetas de aserrín en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.



Anexo 5. Briquetas de bagazo en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.



Anexo 6. *Mimosa tenuiflora* en la cámara de combustión de la estufa HM-4000.



Anexo 7. Foto de briquetas de aserrín secas.



Anexo 8. Foto de briquetas de bagazo secas.



Anexo 9. Datos del balance de energía.

Combustible	Consumo de combustible húmedo (g)	Humedad (%)	Consumo de combustible seco (g)	Energía inicial (kJ)
<i>Pinus oocarpa</i>	570.00	11	510.15	9946.39
<i>Pinus oocarpa</i>	560.00	12	493.36	9619.04
<i>Pinus oocarpa</i>	594.00	12	523.91	10214.6
Palma de coco	830.00	19	670.64	11856.9
Palma de coco	942.00	19	761.14	13456.9
Palma de coco	852.00	20	685.86	12126.0
Aserrín	470.00	11	420.18	5882.52
Aserrín	532.00	11	474.01	6636.17
Aserrín	450.00	10	404.10	5657.40
Bagazo	380.00	13	332.50	5473.62
Bagazo	356.00	11	317.55	5227.54
Bagazo	386.00	12	341.22	5617.23
<i>Mimosa tenuiflora</i>	424.00	12	371.42	7004.69
<i>Mimosa tenuiflora</i>	536.00	13	467.93	8824.65
<i>Mimosa tenuiflora</i>	486.00	14	420.39	7928.14

Anexo 10. Datos del balance de energía

Combustibles	Carbón vegetal (g)	Energía sin liberar (kJ)	Energía liberada (kJ)	Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)
<i>Pinus oocarpa</i>	20.00	588.00	9358.39	222.82
<i>Pinus oocarpa</i>	24.00	705.60	8913.44	212.22
<i>Pinus oocarpa</i>	20.00	588.00	9626.63	300.83
Palma de coco	78.00	2293.20	9563.72	251.68
Palma de coco	84.00	2469.60	10987.28	228.90
Palma de coco	54.00	1587.60	10538.40	234.19
Aserrín	20.00	588.00	5294.52	170.79
Aserrín	28.00	823.20	5812.97	215.30
Aserrín	30.00	882.00	4775.40	238.77
Bagazo	24.00	705.60	4768.02	264.89
Bagazo	16.00	470.40	4757.14	297.32
Bagazo	12.00	352.80	5264.43	329.03
<i>Mimosa tenuiflora</i>	40.00	1176.00	5828.69	388.58
<i>Mimosa tenuiflora</i>	60.00	1764.00	7060.65	294.19
<i>Mimosa tenuiflora</i>	30.00	882.00	7046.14	293.59

Anexo 11. Datos del balance de energía

Combustibles	Total de energía entregada (kJ)	Eficiencia energética (%)	Perdida de energía en carbón vegetal (%)	Potencial de energía liberada no aprovechada (kJ)
<i>Pinus oocarpa</i>	2224.81	22	6	7133.59
<i>Pinus oocarpa</i>	2154.25	22	7	6759.19
<i>Pinus oocarpa</i>	2278.19	22	6	7348.44
Palma de coco	2584.93	22	19	6978.78
Palma de coco	2940.87	22	18	8046.41
Palma de coco	3024.66	25	13	7513.75
Aserrín	1784.18	30	10	3510.34
Aserrín	2007.90	30	12	3805.07
Aserrín	1662.57	29	16	3112.83
Bagazo	1341.55	25	13	3426.46
Bagazo	1385.18	26	9	3371.96
Bagazo	1578.11	28	6	3686.32
<i>Mimosa tenuiflora</i>	1390.46	20	17	4438.22
<i>Mimosa tenuiflora</i>	1712.24	19	20	5348.41
<i>Mimosa tenuiflora</i>	1699.96	21	11	5346.17

Anexo 12. Emisiones contaminantes.

Combustible	Emisiones dióxido de carbono (g)	Emisiones monóxido de carbono (g)	Emisiones de material particulado (PM_{2.5}) (mg)
<i>Pinus oocarpa</i>	786.75	12.28	1150.58
<i>Pinus oocarpa</i>	819.21	12.05	1155.80
<i>Pinus oocarpa</i>	906.42	12.17	874.33
Palma de coco	881.13	27.30	2321.60
Palma de coco	1194.78	42.30	3783.40
Palma de coco	1173.36	36.19	4117.63
Aserrín	755.87	8.67	799.13
Aserrín	599.05	7.92	688.86
Aserrín	784.87	7.79	808.67
Bagazo	550.83	6.76	466.01
Bagazo	564.40	6.31	471.48
Bagazo	551.79	5.58	590.67
<i>Mimosa tenuiflora</i>	508.13	6.71	532.27
<i>Mimosa tenuiflora</i>	684.62	10.48	903.27
<i>Mimosa tenuiflora</i>	748.18	10.54	619.11

Anexo 13. Prueba se normalidad mediante SPSS.

Variables	Combustibles	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Grados de libertad	Significancia
Consumo de combustible húmedo (g)	Pinus oocarpa	0.95	3.00	0.55
	Palma de coco	0.89	3.00	0.36
	Aserrín	0.92	3.00	0.45
	Bagazo	0.89	3.00	0.36
	Mimosa tenuiflora	1.00	3.00	0.88
Consumo de combustible seco (g)	Pinus oocarpa	1.00	3.00	0.89
	Palma de coco	0.87	3.00	0.30
	Aserrín	0.91	3.00	0.42
	Bagazo	0.98	3.00	0.71
	Mimosa tenuiflora	1.00	3.00	0.98
Humedad (%)	Pinus oocarpa	0.80	3.00	0.12
	Palma de coco	0.83	3.00	0.18
	Aserrín	0.98	3.00	0.70
	Bagazo	1.00	3.00	0.94
	Mimosa tenuiflora	0.94	3.00	0.51
Energía inicial (kJ)	Pinus oocarpa	1.00	3.00	0.89
	Palma de coco	0.87	3.00	0.30
	Aserrín	0.91	3.00	0.42
	Bagazo	0.98	3.00	0.71
	Mimosa tenuiflora	1.00	3.00	0.98
Carbón vegetal remanente (g)	Pinus oocarpa	0.84	3.00	0.21
	Palma de coco	0.91	3.00	0.43
	Aserrín	0.97	3.00	0.66
	Bagazo	1.00	3.00	0.99
	Mimosa tenuiflora	0.75	3.00	0.01
Energía sin liberar (kJ)	Pinus oocarpa	0.75	3.00	0.00
	Palma de coco	0.89	3.00	0.36
	Aserrín	0.89	3.00	0.36
	Bagazo	0.96	3.00	0.64
	Mimosa tenuiflora	0.96	3.00	0.64
Energía liberada (kJ)	Pinus oocarpa	0.98	3.00	0.73
	Palma de coco	0.96	3.00	0.60
	Aserrín	1.00	3.00	1.00
	Bagazo	0.77	3.00	0.04

	Mimosa tenuiflora	0.76	3.00	0.02
	Pinus oocarpa	0.75	3.00	0.00
Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	Palma de coco	0.89	3.00	0.36
	Aserrín	0.89	3.00	0.36
	Bagazo	0.96	3.00	0.64
	Mimosa tenuiflora	0.96	3.00	0.64
	Pinus oocarpa	0.99	3.00	0.85
Total de energía entregada (kJ)	Palma de coco	0.89	3.00	0.34
	Aserrín	0.97	3.00	0.68
	Bagazo	0.88	3.00	0.33
	Mimosa tenuiflora	0.78	3.00	0.06
	Pinus oocarpa	0.98	3.00	0.70
Energía no entregada (kJ)	Palma de coco	1.00	3.00	1.00
	Aserrín	0.99	3.00	0.84
	Bagazo	0.88	3.00	0.31
	Mimosa tenuiflora	0.75	3.00	0.00
	Pinus oocarpa	0.93	3.00	0.51
Emisiones dióxido de carbono (g)	Palma de coco	0.80	3.00	0.12
	Aserrín	0.86	3.00	0.28
	Bagazo	0.80	3.00	0.12
	Mimosa tenuiflora	0.93	3.00	0.49
	Pinus oocarpa	0.76	3.00	0.03
Emisiones monóxido de carbono (g)	Palma de coco	0.88	3.00	0.34
	Aserrín	0.81	3.00	0.14
	Bagazo	0.78	3.00	0.07
	Mimosa tenuiflora	0.91	3.00	0.43
	Pinus oocarpa	1.00	3.00	0.95
Emisiones de material particulado (PM _{2.5}) (mg)	Palma de coco	0.99	3.00	0.80
	Aserrín	0.85	3.00	0.24
	Bagazo	0.98	3.00	0.74
	Mimosa tenuiflora	0.76	3.00	0.03

Anexo 14. Análisis de varianza ANDEVA con un factor.

Variab les	Grad os de libert ad	Media cuadrática	F	Significancia
Consumo de combustible húmedo (g)	4	109247.60	60.33	0.00
Consumo de combustible seco (g)	4	60063.82	46.96	0.00
Humedad (%)	4	46.38	51.42	0.00
Energía inicial (kJ)	4	17587303.37	58.14	0.00
Carbón vegetal remanente (g)	4	1510.00	13.58	0.00
Energía sin liberar (kJ)	4	1305183.60	13.58	0.00
Energía liberada (kJ)	4	17587303.37	58.14	0.00
Velocidad de transferencia de energía (kJ/min)	4	6735.91	4.38	0.03
Total de energía entregada (kJ)	4	960902.33	34.78	0.00
Eficiencia energética (%)	4	0.00	32.825	0.00
Energía no entregada (kJ)	4	11036391.85	69.13	0.00
Emisiones dióxido de carbono (g)	4	125116.23	10.42	0.00
Emisiones de material particulado (PM _{2.5}) (mg)	4	4340435.10	22.03	0.00
Emisiones monóxido de carbono (g)	4	429.81	34.54	0.00

Anexo 15. Prueba Duncan de la energía en el carbón vegetal remanente (kJ)

Combustibles	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Bagazo	3	509.60		
<i>Pinus oocarpa</i>	3	627.20		
Aserrín	3	764.40	764.40	
<i>Mimosa tenuiflora</i>	3		1274.00	
Palma de coco	3			2116.80
Significancia		0.36	0.07	1.00

Anexo 16. Prueba de ebullición de agua modificada con pino.

WBT modificado			
Tesista	María León	María León	María León
Modelo del ítem de evaluación	HM-4000	HM-4000	HM-4000
Fecha del ensayo	23/5/2017	24/5/2017	6/7/2017
Número de la prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tipo de combustible	Pino	Pino	Pino
Temperatura del aire (°C)	29.50	28.80	27.00
Humedad relativa (%)	55.00	59.00	62.00
Peso de olla 1 para agua (kg)	0.19	0.19	0.20
Peso de olla 2 para agua (kg)	0.25	0.25	0.25
Peso promedio de filtro limpio (g)	0.64	0.65	0.63
Peso promedio de filtro sucio (g)	0.65	0.65	0.63
Humedad promedio del combustible (%)	10.50	11.90	11.80
Peso de recipiente para combustible (kg)	0.61	0.61	0.61
Peso de recipiente para astilla y viruta (kg)	0.34	0.34	0.34
Peso de olla para ceniza (kg)	0.33	0.33	0.33
Punto de ebullición (°C)	96.20	96.20	96.20
Factor de calibración	Ter01-04	Ter01-04	Ter01-04
N° de IAP	5103	5103	5103
Hora de encendido de IAP	12:57 p. m.	12:47 p. m.	1:56 p. m.
Dato del Magnehelic	0.46	0.48	0.50
Hora de encendido magnehelic	1:03 p. m.	12:51 p. m.	2:15 p. m.
Tiempo inicial	1:13 p. m.	1:01 p. m.	2:25 p. m.
Tiempo final	1:55 p. m.	1:43 p. m.	2:57 p. m.
Peso del combustible inicial (kg)	2.56	2.32	2.73
Peso del combustible final (kg)	1.99	1.76	2.14
Temperatura inicial del agua, Olla 1 (°C)	24.60	24.00	24.00
Temperatura final del agua, Olla 1 (°C)	96.10	96.10	96.10
Temperatura inicial del agua, Olla 2 (°C)	24.30	24.40	24.00
Temperatura final del agua, Olla 2 (°C)	73.80	73.90	78.00
Peso inicial de Olla 1 con agua (kg)	2.69	2.69	2.70
Peso final de Olla 1 con agua (kg)	2.38	2.40	2.37
Peso inicial de Olla 2 con agua (kg)	2.75	2.75	2.75
Peso final de Olla 2 con agua (kg)	2.65	2.66	2.66
Peso de Olla + Ceniza (kg)	0.35	0.35	0.33

Anexo 17. Prueba de ebullición de agua con vainas de palma de coco.

WBT modificado			
Tesista	María León	María León	María León
Modelo del ítem de evaluación	HM-4000	HM-4000	HM-4000
Fecha del ensayo	12/6/2017	13/6/2017	14/6/2017
Número de la prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tipo de combustible	Palma de coco	Palma de coco	Palma de coco
Temperatura del aire (°C)	26.50	25.40	25.60
Humedad relativa (%)	68.00	70.00	65.00
Peso de olla 1 para agua (kg)	0.19	0.19	0.19
Peso de olla 2 para agua (kg)	0.25	0.25	0.25
Peso promedio de filtro limpio (g)	0.64	0.65	0.64
Peso promedio de filtro sucio (g)	0.64	0.65	0.65
Humedad promedio del combustible(%)	19.20	22.10	19.50
Peso de recipiente para combustible (kg)	0.61	0.61	0.61
Peso de recipiente para astilla y viruta (kg)	0.34	0.34	0.34
Peso de olla para ceniza (kg)	0.33	0.33	0.33
Punto de ebullición (°C)	96.10	96.10	96.10
Factor de calibración	Ter 03	Ter 03	Ter 03
N° de IAP	5103	5103	5103
Hora de encendido de IAP	9:25 a. m.	8:31 a. m.	8:38 a. m.
Dato del Magnehelic	0.48	0.48	0.48
Hora de encendido magnehelic	9:31 a. m.	8:42 a. m.	8:44 a. m.
Tiempo inicial	9:41 a. m.	8:52 a. m.	8:54 a. m.
Tiempo final	10:19 a. m.	9:39 a. m.	9:39 a. m.
Peso del combustible inicial (kg)	1.67	1.98	2.31
Peso del combustible final (kg)	0.84	1.03	1.45
Temperatura inicial del agua, Olla 1 (°C)	24.30	23.20	23.90
Temperatura final del agua, Olla 1 (°C)	96.10	96.10	96.10
Temperatura inicial del agua, Olla 2 (°C)	24.30	23.20	23.90
Temperatura final del agua, Olla 2 (°C)	71.20	75.80	77.00
Peso inicial de Olla 1 con agua (kg)	2.69	2.69	2.69
Peso final de Olla 1 con agua (kg)	2.25	2.17	2.15
Peso inicial de Olla 2 con agua (kg)	2.75	2.75	2.75
Peso final de Olla 2 con agua (kg)	2.60	2.56	2.54
Peso de Olla + Ceniza (kg)	0.40	0.41	0.38

Anexo 18. Prueba de ebullición de agua con briquetas de aserrín.

WBT modificado			
Tesista	María León	María León	María León
Modelo del ítem de evaluación	HM-4000	HM-4000	HM-4000
Fecha del ensayo	29/8/2017	16/6/2017	30/6/2017
Número de la prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tipo de combustible	Aserrín	Aserrín	Aserrín
Temperatura del aire (°C)	25.30	25.20	29.00
Humedad relativa (%)	66.00	78.00	51.00
Peso de olla 1 para agua (kg)	0.20	0.19	0.20
Peso de olla 2 para agua (kg)	0.25	0.25	0.20
Peso promedio de filtro limpio (g)	0.64	0.64	0.64
Peso promedio de filtro sucio (g)	0.64	0.64	0.64
Humedad promedio del combustible (%)	10.60	11.30	10.20
Peso de recipiente para combustible (kg)	0.69	0.69	0.69
Peso de recipiente para astilla y viruta (kg)	0.34	0.34	0.34
Peso de olla para ceniza (kg)	0.33	0.33	0.33
Punto de ebullición (°C)	96.10	96.10	96.10
Factor de calibración	Ter 01-04	Ter 03	Ter 03
N° de IAP	5103	5103	5103
Hora de encendido de IAP	8:35 a. m.	8:37 a. m.	2:23 p. m.
Dato del Magnehelic	0.50	0.49	0.50
Hora de encendido magnehelic	8:38 a. m.	8:43 a. m.	2:33 p. m.
Tiempo inicial	8:48 a. m.	8:53 a. m.	2:43 p. m.
Tiempo final	9:19 a. m.	9:20 a. m.	3:03 p. m.
Peso del combustible inicial (kg)	0.884	0.90	1.30
Peso del combustible final (kg)	0.414	0.37	0.85
Temperatura inicial del agua, Olla 1 (°C)	23.4	23.70	24.00
Temperatura final del agua, Olla 1 (°C)	96.1	96.10	96.10
Temperatura inicial del agua, Olla 2 (°C)	23.7	23.70	24.00
Temperatura final del agua, Olla 2 (°C)	69.20	73.60	62.80
Peso inicial de Olla 1 con agua (kg)	2.70	2.69	2.70
Peso final de Olla 1 con agua (kg)	2.51	2.44	2.50
Peso inicial de Olla 2 con agua (kg)	2.75	2.75	2.69
Peso final de Olla 2 con agua (kg)	2.69	2.68	2.66
Peso de Olla + Ceniza (kg)	0.35	0.36	0.36

Anexo 19. Prueba de ebullición con briquetas de bagazo.

WBT modificado			
Tesista	María León	María León	María León
Modelo del ítem de evaluación	HM-4000	HM-4000	HM-4000
Fecha del ensayo	26/6/2017	29/0617	3/7/2017
Número de la prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tipo de combustible	Bagazo	Bagazo	Bagazo
Temperatura del aire (°C)	26.30	26.30	27.00
Humedad relativa (%)	60.00	44.00	62.00
Peso de olla 1 para agua (kg)	0.19	0.20	0.20
Peso de olla 2 para agua (kg)	0.25	0.25	0.25
Peso promedio de filtro limpio (g)	0.64	0.63	0.64
Peso promedio de filtro sucio (g)	0.64	0.63	0.64
Humedad promedio del combustible (%)	12.50	10.80	11.60
Peso de recipiente para combustible (kg)	0.69	0.69	0.69
Peso de recipiente para astilla y viruta (kg)	0.34	0.34	0.34
Peso de olla para ceniza (kg)	0.33	0.33	0.33
Punto de ebullición (°C)	96.1°C	96.1°C	96.1°C
Factor de calibración	Ter01-04	Ter01-04	Ter01-04
N° de IAP	5103	5103	5103
Hora de encendido de IAP	9:45 a. m.	2:32 p. m.	2:08 p. m.
Dato del magnehelic	0.48	0.50	0.50
Hora de encendido magnehelic	10:03 a. m.	2:39 p. m.	2:13 p. m.
Tiempo inicial	10:13 a. m.	2:49 p. m.	2:23 p. m.
Tiempo final	10:31 a. m.	3:05 p. m.	2:39 p. m.
Peso del combustible inicial (kg)	1.016	0.81	0.88
Peso del combustible final (kg)	0.636	0.45	0.50
Temperatura inicial del agua, Olla 1 (°C)	23.50	24.00	24.00
Temperatura final del agua, Olla 1 (°C)	96.10	96.10	96.10
Temperatura inicial del agua, Olla 2 (°C)	23.50	24.00	24.00
Temperatura final del agua, Olla 2 (°C)	59.20	55.30	63.80
Peso inicial de Olla 1 con agua (kg)	2.70	2.70	2.70
Peso final de Olla 1 con agua (kg)	2.56	2.58	2.55
Peso inicial de Olla 2 con agua (kg)	2.75	2.69	2.70
Peso final de Olla 2 con agua (kg)	2.73	2.67	2.67
Peso de Olla + Ceniza (kg)	0.35	0.35	0.34

Anexo 20. Prueba de ebullición de agua con Mimosa tenuiflora.

WBT modificado			
Tesista	María León	María León	María León
Modelo del ítem de evaluación	HM-4000	HM-4000	HM-4000
Fecha del ensayo	3/7/2017	4/7/2017	5/7/2017
Número de la prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tipo de combustible	Carbón	Carbón	Carbón
Temperatura del aire (°C)	24.00	25.90	23.40
Humedad relativa (%)	67.00	71.00	82.00
Peso de olla 1 para agua (kg)	0.20	0.20	0.20
Peso de olla 2 para agua (kg)	0.19	0.25	0.25
Peso promedio de filtro limpio (g)	0.64	0.64	0.64
Peso promedio de filtro sucio (g)	0.63	0.64	0.64
Humedad promedio (%)	12.40	12.70	13.50
Peso de recipiente para combustible (kg)	0.61	0.61	0.61
Peso de recipiente para astilla y viruta (kg)	0.34	0.34	0.34
Peso de olla para ceniza (kg)	0.33	0.33	0.33
Punto de ebullición (°C)	96.20	96.20	96.20
Factor de calibración	Ter01-04	Ter01-04	Ter01-04
N° de IAP	5103	5103	5103
Hora de encendido de IAP	8:37 a. m.	9:43 a. m.	8:40 a. m.
Dato del Magnehelic	0.50	0.50	0.50
Hora de encendido magnehelic	8:42 a. m.	9:48 a. m.	8:44 a. m.
Tiempo inicial	8:52 a. m.	9:58 a. m.	5:54 a. m.
Tiempo final	9:07 a. m.	10:22 a. m.	9:18 a. m.
Peso del combustible inicial (kg)	2.09	2.04	1.81
Peso del combustible final (kg)	1.66	1.48	1.33
Temperatura inicial del agua, Olla 1 (°C)	22.90	23.00	22.90
Temperatura final del agua, Olla 1 (°C)	96.10	96.10	96.10
Temperatura inicial del agua, Olla 2 (°C)	22.90	23.00	22.90
Temperatura final del agua, Olla 2 (°C)	54.90	69.00	65.90
Peso inicial de Olla 1 con agua (kg)	2.70	2.70	2.70
Peso final de Olla 1 con agua (kg)	2.58	2.53	2.52
Peso inicial de Olla 2 con agua (kg)	2.69	2.75	2.75
Peso final de Olla 2 con agua (kg)	2.68	2.71	2.71
Peso de Olla + Ceniza (kg)	0.37	0.42	0.36