

# **Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles**

**Julio Alejandro Herrera Viteri**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2010

ZAMORANO  
CARRERA DE DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

# **Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles**

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

Presentado por

**Julio Alejandro Herrera Viteri**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2010

# **Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles**

Presentado por:

Julio Alejandro Herrera Viteri

Aprobado:

---

Timothy Longwell, M.Sc.  
Asesor principal

---

Arie Sanders, M.Sc.  
Director  
Carrera de Desarrollo Socioeconómico  
y Ambiente

---

Reyna Guzman, Ing.  
Asesora

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

---

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.  
Rector

## RESUMEN

Herrera Viteri, JA. 2010. Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 43p.

Las estufas T-LUD utilizan una tecnología de micro-gasificación que permite usar diferentes tipos de biomasa como combustible, controlar y dividir el ingreso del oxígeno primario y secundario, realizando una combustión más completa al quemar gases en lugar de ser emitidos al ambiente. Para cuantificar el desempeño de la estufa se utilizó el protocolo WBT modificado para estufas T-LUD, que consiste básicamente en hervir cinco litros de agua. Se evaluó la estufa usando tres diferentes materiales como combustible: olote, viruta y ramas de pino. Se determinó que al usar ramas de pino se tiene la mayor concentración de CO y PM (66 g/kg y 4,985 mg/kg, respectivamente). En cambio la viruta de pino es el combustible que tiene mayor emisión de CO<sub>2</sub> (1,096 g/kg). El olote tiene las menores concentraciones de CO y CO<sub>2</sub> (42 g/kg y 902 g/kg, respectivamente) en comparación a las emisiones que se dan al usar viruta y las ramas de pino. En los indicadores de desempeño (tiempo de ebullición, eficiencia térmica, velocidad de combustión, potencia del fuego, consumo específico del combustible y equivalente de combustible consumido) solamente se encontraron diferencias en la potencia del fuego, siendo menor al usar olote en comparación a la viruta y ramas de pino. Se identificó que la estufa T-LUD usando olote como combustible, tiene una mayor reducción de emisiones CO<sub>2</sub> (600 g/kg) y emisiones menores de CO y PM (26 g/kg y 1,611 mg/kg, respectivamente) en comparación con la estufa Inkahuasi que tiene concentraciones de 4,002 g/kg CO<sub>2</sub>, 48 g/kg CO y 2,355 mg/kg PM.

**Palabras clave:** combustible, estufa T-LUD, emisiones de gases, protocolo WBT.

## SIGLAS Y ABREVIACIONES

IDD	Inverted Down Draft
T-LUD	Top Lit Up Draft
DALYs	Disability Adjusted Life Years
IAP	Indoor Air Pollution
WBT	Water Boiling Test
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
PM	Micro partículas
IRI	Infecciones Respiratorias Inferiores
IRA	Infecciones Respiratorias Agudas
IRAB	Infecciones Respiratorias Agudas Bajas
PEMS	Portable Emissions Monitoring System
GCV	Gross Calorific Value

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Siglas y abreviaciones .....	iv
Contenido .....	v
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	vi
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>27</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>28</b>
<b>8. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>29</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>32</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1. Poder Calorífico (kJ/kg) de los combustibles utilizados .....	14
2. Indicadores del desempeño de la estufa T-LUD por cada tipo de combustible .....	15
Figura	Página
1. Promedio de emisiones de CO <sub>2</sub> por combustible en T-LUD .....	16
2. Promedio de emisiones de CO por combustible en T-LUD .....	17
3. Promedio de emisiones de PM por combustible en T-LUD .....	17
4. Factor de emisión de CO <sub>2</sub> por cada tipo de combustible .....	18
5. Factor de emisión de CO por cada tipo de combustible .....	19
6. Factor de emisión de PM por cada tipo de combustible .....	19
7. Tiempo de ebullición usando los diferentes combustibles .....	20
8. Eficiencia térmica usando los diferentes combustibles .....	21
9. Velocidad de combustión usando los diferentes combustibles .....	21
10. Potencia del fuego usando los diferentes combustibles .....	22
11. Equivalente de combustible consumido por combustible .....	23
12. Consumo específico de los diferentes combustibles .....	23
13. Emisiones de CO <sub>2</sub> en la estufa Inkahuasi y la T-LUD .....	24
14. Emisiones de CO en la estufa Inkahuasi y la T-LUD .....	25
15. Emisiones de PM en la estufa Inkahuasi y la T-LUD .....	25
Anexo	Página
1. Conceptos básicos .....	32
2. Diseño de la estufa T-LUD Peko-Pe .....	34
3. Forma de ensamblaje de la estufa T-LUD Peko-Pe. ....	35
4. Estufa gasificadora T-LUD Peko-Pe .....	36
5. Residuos forestales, viruta de pino (A) y ramas de pino (B) .....	37
6. Residuos agrícolas, olotes (A) y cáscaras de arroz (B). ....	38
7. Equipo para la medición de emisiones-PEMS. ....	39
8. Cámara de combustión con combustible y con biochar después de la combustión ...	40
9. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando viruta de pino.....	41
10. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando ramas de pino.....	42
11. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando olote .....	43

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estufas mejoradas fueron desarrolladas con el objetivo de hacer más eficiente la combustión, y así reducir el consumo de leña y emisiones de gases tóxicos tanto para la salud de personas como contaminantes para el ambiente. Las estufas a base de leña son utensilios del hogar que facilitan la preparación de los alimentos en zonas donde los pobladores no cuentan con los recursos económicos suficientes para adquirir y mantener una cocina de gas o eléctrica.

En la mayoría del mundo la fuente primaria de energía para uso doméstico es la biomasa y la forma más utilizada es la leña, aunque existen zonas donde hay escases de este recurso y donde se depende de formas alternas de biomasa. La materia vegetal y el estiércol animal son dos tipos de combustibles orgánicos que se utilizan en estufas mejoradas (Shackleton *et al.*, 2004).

Los diseños de estufas varían de acuerdo a las condiciones del lugar, los materiales disponibles, el tipo de combustible y la dieta básica de las personas. Para poder reducir las emisiones y el uso de leña, el diseñador de estufas se esfuerza principalmente en que el fuego queme más limpiamente y que la mayor cantidad de calor pase en lo posible a la hornilla o la plancha (Bryden *et al.*, 2006). Actualmente diferentes investigadores están construyendo y realizando modificaciones a partir de modelos “top-lit up draft” (T-LUD, por su siglas en inglés) que significa corriente ascendente de encendido arriba. Estos modelos utilizan tecnología de micro-gasificación, que incrementan el rendimiento del combustible, a la vez se reduce el consumo de materia orgánica y el de emisiones de gases tóxicos para el ser humano y contaminantes para el ambiente (Anderson, 2009).

En el caso de las estufas a base de biomasa crea un ciclo en el proceso, donde la leña es un recurso renovable, si se realiza un aprovechamiento sostenible. Una alternativa que ofrecen los diseños de estufas con gasificación es la opción de utilizar diferentes tipos de biomasa a partir de residuos forestales y agrícolas como: ramas de pino, desperdicio de carpintería, olotes, cáscara de arroz o café, briquetas de materia vegetal, excremento animal, entre otros. Materiales que gracias al diseño de estufas T-LUD permitirán alcanzar un desempeño más eficiente, mejorando el proceso de cocción de alimentos y reduciendo la cantidad de emisiones (Anderson y Reed, 2004).

La gasificación se define como la conversión termoquímica en donde un sólido combustible es quemado y transformado a un gas portador de energía por medio de una oxidación parcial a una elevada temperatura, donde el gas es quemado de una manera más eficiente y limpia (Oñate, 2006).

La distinción entre las características de estufas T-LUD de otras estufas está en el ingreso de oxígeno primario que da inicio a la combustión inicial, la producción de gases (humo) y el ingreso de oxígeno secundario que al entrar en contacto con los gases produce una combustión secundaria. Considerando que los flujos de oxígeno primario y secundario en el gasificador son separados a diferencia del proceso de la mayoría de estufas donde estos se mezclan. El control de flujo de oxígeno permite limpiar la combustión, además controla el ingreso de oxígeno reduciendo el enfriamiento y manteniendo el calor (Anderson, 2010).

## 1.1 ANTECEDENTES

El Dr. Thomas Reed experto reconocido en la gasificación a nivel de biomasa, ha propuesto y hecho la comprobación inicial de una forma innovadora al quemar biomasa en pequeñas cantidades. Estas prácticas de gasificación en dispositivos de un menor tamaño conocida como micro-gasificación, al principio lo llamó un “Inverted Down-Draft”, (IDD), lo que actualmente llamamos un “Top-Lit Up- Draft”, (T-LUD) (Reed, 1985).

“Posteriormente el Dr. Reed, durante un momento de inspiración acerca de gasificación T-LUD, en el año de 1985 realizó las pruebas de laboratorio iniciales que posteriormente dieron lugar a una iniciativa con el Dr. Ronal Larson titulado: Una estufa de madera-gas para los países en desarrollo. El modelo de estufas T-LUD están siendo utilizadas actualmente” (Reed y Larson, 1996). En detalle las características fundamentales de estufas con sistema T-LUD son:

- Una cantidad controlable de oxígeno primario entra por la base del cilindro interior y circula hacia arriba a través de la cámara de combustión llena con la biomasa (olotes, cáscara de arroz o café, briquetas de materia vegetal o excremento animal, entre otras) la cual debe estar seca.
- Un pequeño fuego que se enciende en la parte superior de la biomasa que arde (pirólisis) a temperaturas relativamente bajas en presencia limitada de oxígeno. Al consumirse todo el oxígeno se empieza a liberar humo caliente.
- Una cantidad controlada de oxígeno secundario entra en contacto con el humo caliente. Posteriormente al mezclarse con el oxígeno son altamente inflamables, produciendo una llama de gas que se puede utilizar para cocinar.

En resumen, los gasificadores T- LUD crean intencionalmente emisiones (humo) que luego se queman en condiciones controladas (oxígeno secundario) produciendo una combustión más completa y con menos emisiones de gases contaminantes. Adicionalmente, durante el proceso de combustión existe la opción para la creación de subproductos como el carbón vegetal (biochar) o ceniza a partir de la biomasa consumida, dependiendo de la cantidad de oxígeno primario. El biochar puede aprovecharse tanto para el aumento de nutrientes en el suelo o como otro tipo de combustible. Si por lo

contrario se prefiere o desea un mayor tiempo de cocción, el diseño de la estufa debe variar en las entradas de oxígeno primario. Se pueden hacer más orificios en la base de la cámara de combustión con el objetivo de aumentar el ingreso de oxígeno primario y tener una combustión más eficiente, quemando la mayor parte del combustible.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente en los países en vías de desarrollo, específicamente en las regiones rurales, existen problemas en el sistema de preparación o cocción de alimentos que comúnmente se realiza con un fuego abierto o estufa tradicional. La estructura de una estufa tradicional consiste básicamente: en un soporte que este a una determinada altura del suelo, un comal o una rejilla que pueda mantener al recipiente donde se van a cocinar los alimentos y en la base del soporte va la biomasa que se utilizara para cocinar los alimentos. Los principales efectos para las personas y el ambiente ocasionados por las estufas son:

- Las concentraciones intramuros (humo retenido) son productos de la combustión realizada en estufas, que afectan directamente a las personas que están más relacionadas con el uso de la estufa, como son las mujeres y los niños. Las emisiones de CO y PM ocasionan problemas de intoxicación y enfermedades en las vías respiratorias respectivamente (Aprovecho Research Center, USA).
- Riesgos de quemaduras, al no manipular correctamente estas estufas.
- La baja eficiencia que es la causa de un aumento en el consumo de combustible (leña). La pérdida de tiempo al tener que recolectar leña o mayores gastos al tener que comprarla.
- Aumento de la degradación de los boques, por un el alto consumo de leña.
- Contaminación atmosférica mediante el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>. Gases que contribuyen al efecto invernadero y por ende al cambio climático.

### **1.2.1 Concentraciones intramuros influyen en la salud de las personas**

Las concentraciones intramuros son los gases tóxicos emitidos durante la preparación de alimentos utilizando estufas de biomasa, la exposición a estas emisiones de CO puede producir enfermedades en las vías respiratorias. Las diez principales enfermedades y diez discapacidades que causan la mortalidad en los países en desarrollo son denominadas “Disability-Adjusted Life Years” (DALYs, por sus siglas en inglés). Entre estas enfermedades están las Infecciones Respiratorias Inferiores (IRI) que representan 8.2% de los DALYs que según Organización Mundial de la Salud (OMS) son la segunda peor categoría de enfermedades y lesiones en los seres humanos. Esta cifra es superada por el VIH / SIDA (DALYs 9.0%) y está por encima de las enfermedades diarreicas (DALYs

6.3%), (OMS, 2002). Los cuatro factores de riesgo sobre las llamadas IRI en los países en vías de desarrollo son:

- Problemas nutricionales por la deficiencia de zinc.
- El tabaco que es una elección individual de emisión.
- El humo en interiores causado por combustibles sólidos llamado en otros lugares como indoor air pollution (IAP, por sus siglas en inglés).
- Peso inferior al normal que es consecuencia debido a la intoxicación por monóxido de carbono de las mujeres embarazadas que usan cocinas inadecuadas.

Los dos últimos factores representan el mayor riesgo, para que las personas sean más propensas a desarrollar IRI. Categorizando a la contaminación de aire de interiores, causado por combustibles sólidos como el quinto factor de riesgo (DALYs 3.7%) que contribuye a la mortalidad en los países en desarrollo (OMS, 2002).

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

En la actualidad existen alrededor de dos millones de personas que cocinan utilizando como fuente de energía combustibles sólidos, biomasa de diferentes tipos de materiales (residuos agrícolas y forestales). Las personas emplean estufas: tradicionales, de tres piedras y en pocos casos son estufas que han sido ligeramente mejoradas. En algunas estufas son adaptadas piezas como chimeneas, pero aun así la mayor parte de estufas tradicionales no tienen implementada esta mejora (OMS, 2002).

Por otro parte, en sociedades más desarrolladas se han encontrado soluciones a los problemas causados por las estufas, reduciendo la contaminación de aire en interiores entre otros. Mediante la mejora de la ciencia y tecnología al realizar dos ajustes simultáneos:

- Los combustibles procesados y refinados como el propano, el querosén, el gas natural y la electricidad son materias primas utilizadas en estufas con un alto rendimiento y un bajo nivel de contaminación del aire en interiores. El inconveniente es el alto costo de estos bienes por lo que no toda la población tiene las mismas condiciones económicas para acceder a ellos.
- Desarrollo de dispositivos de combustión llamados “estufas mejoradas” que pueden quemar biomasa que en la mayoría de los casos se usa leña. Reduciendo el costos que en comparación con las estufas a gas o eléctricas son más altos. Además se puede reducir la cantidad de emisiones y tener una buena ventilación.

En el mercado se encuentra gran variedad de estufas mejoradas, con diferentes rendimientos en combustión, consumo de leña y transmisión de calor entre otros

indicadores que permiten medir el desempeño en la estufa. Actualmente existente científicos, estudiantes y personas que trabajan aisladamente pero en relación a un mismo tema. Entusiastas que se han comprometido en experimentar y desarrollar los gasificadores T-LUD uno de ellos, el Dr. Paul S. Anderson. Quien ha desarrollado alrededor de 50 modelos de gasificadores utilizando material reciclado como latas de café, latas de pintura, de leche en polvo o aceite para motores. Estos materiales son aceptables para la fabricación de estufas T-LUD por que están fabricados con láminas de metales que son resistentes al poder del calor que se genera durante la combustión.

El desempeño en los gasificadores T-LUD tanto a nivel de eficiencia de la combustión y cantidad de emisiones pueden ser afectados a causa de factores como ejemplo: la relación del oxígeno con el combustible, el tamaño y la posiciones por donde ingresa el oxígeno primario y secundario, el pre-calentamiento del oxígeno, comparación del tiro natural contra el funcionamiento con aire forzado por un ventilador, el tamaño de la estufa, los tipos y tamaño del combustible.

El presente estudio pretende evaluar el desempeño del diseño T-LUD con tecnología de micro-gasificación. Comprobando así las ventajas que presenta este diseño, al mejorar el aprovechamiento del combustible. Para lo cual se utilizaran diferentes alternativas de biomasa en este caso viruta de pino, ramas de pino, olote y cáscara de arroz. Observando y comparando los resultados de comportamiento de la estufa con los diferentes combustibles al medir las emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y PM.

#### **1.4 LÍMITES Y ALCANCES DEL ESTUDIO**

Entre las limitantes del estudio se pueden mencionar: ninguna clase de conocimiento o experiencia en fabricación de estufas mejoradas; conocimiento y experiencia nula sobre el manejo de herramientas para realizar soldaduras; y poca disponibilidad de literatura o fuentes relacionadas al tema de estudio.

Los alcances del estudio incluyen: aportar con un documento que sirva como base para futuros estudios en el tema de micro-gasificación en estufas; manejo del equipo “Portable Emissions Monitoring System” (PEMS) para la medición de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM.

#### **1.5 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El objetivo general del estudio es fabricar el modelo de estufa T-LUD, evaluar su eficiencia y emisiones con diferentes combustibles. Los objetivos específicos son: fabricar la estufa T-LUD Peko-Pe versión 2008, utilizando lámina de acero; medir y comparar el desempeño de la estufa T-LUD, con diferentes tipos de combustibles, residuos agrícolas y forestales; utilizar el protocolo Water Boiling Test (WBT) modificada para T-LUD; comparar la concentración de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, y PM entre la estufa T-LUD Peko-Pe y la estufa Inkahuasi.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 TERMINOLOGÍA (ANEXO 1)**

### **2.2 FUEGO ABIERTO**

A inicios de 1970 y finales de 1980, los fuegos abiertos fueron catalogados como ineficientes. Se sabe que los fuegos abiertos pueden quemar de forma eficaz y limpia a pesar de que su consumo de combustible es alto. En la mayoría de los casos, las cocineras no se preocupan del combustible utilizado. El Dr. Grant Ballard y el Dr. Kirk Smith fueron los primeros científicos en descubrir que los fuegos abiertos usan una cantidad excesiva de madera para la cocción de una pequeña cantidad de alimentos. Por otra parte en lugares donde existe una escasez de materiales combustibles los fuegos abiertos son controlados cuidadosamente logrando una eficacia con nivel de competir contra estufas de primera generación. Fue entonces el fuego abierto el punto de partida donde se ubicaron los investigadores para desarrollar estufas mejoradas (Bryden *et al.*, 2006).

Un fuego abierto puede alcanzar una eficiencia del 90%, al momento de transformar la madera en calor. La gran desventaja del fuego abierto es que solo una pequeña proporción de entre el 10% al 40% de calor es transferido a la olla. En estufas mejoradas aumentar la eficiencia de la combustión es necesario para reducir el humo y las emisiones dañinas, también aumentar la eficiencia del intercambio térmico ayuda a reducir el uso de combustible por ende a reducir las emisiones (Bryden *et al.*, 2006).

### **2.3 MICRO-GASIFICACIÓN DE BIOMASA**

Al momento de quemar cualquier tipo de biomasa, se producen gases que son liberados y quemados en algunos casos de una forma poco eficiente. Los científicos son conscientes desde hace décadas que la combustión de materiales sólidos (biomasa) es menos limpia que al quemar el oxígeno mezclado con gases combustibles. Una combustión normal es más incompleta que una combustión utilizando micro-gasificación. Debido a que en una combustión normal el fuego continúa donde hay presencia de combustible sólido y los gases en su mayoría no son quemados. La característica principal de un gasificador es la creación de gases combustibles que son quemados en un lugar diferente a donde fueron producidos (Anderson *et al.*, 2007).

La gasificación en estufas T-LUD se han dividido en dos categorías de acuerdo a su fuente de oxígeno pueden ser: oxígeno forzado (ventilador) o tiro natural. Las estufas con

ventilador circulan el oxígeno produciendo una combustión más limpia, controlando la entrada de oxígeno y esparciendo el calor. La gasificación T-LUD opera con cargas de combustible, que al producirse la reacción termoquímica (pirólisis) son agotados y para una siguiente combustión se debe rellenar la cámara de combustión. Por esta razón es necesario tener un cartucho de combustible extra que permita mantener una cocción continua (Anderson *et al.*, 2007).

Es posible una gran variedad de combustibles que pueden darse para el uso de T-LUD pero es importante seguir una serie de parámetros. La biomasa debe estar seca con tamaños parecidos o pequeños trozos a través de los cuales el flujo de oxígeno primario pueda pasar sin problemas de forma controlada sin flujos demasiado altos o bajos que circulen por los canales. Pellets y briquetas con buenas mediciones son excelentes, al igual que los tamaños razonables de algunas semillas. Tallos leñosos, ramas y la madera en forma de astillas y tiras. Algunos combustibles como la cáscara de arroz requiere de T-LUD con aire forzado para que pueda quemar con éxito. Una limitante al utilizar este tipo de combustible es el tiempo de duración de la combustión que es más corta (Anderson *et al.*, 2007).

En general todas las estufas dependen de un flujo de oxígeno aceptable. En las T-LUD de tiro natural el flujo de oxígeno se mueve por convección. Parte clave en el diseño de tiro natural es la posición y los tamaños de los agujeros que son factores que permiten fortalecer y controlar la circulación de la entrada de oxígeno primario y secundario lograr una gasificación verdadera. La separación localizada entre la cámara de combustión y la zona de cocción proporciona el espacio y el tiempo necesario para la combustión más completa de los gases (Anderson y Reed, 2004).

## **2.4 EFECTOS DE LOS PARÁMETROS PARA MEDIR EL DESEMPEÑO Y EMISIÓN EN ESTUFAS DE FUEGO DIRECTO**

Los parámetros que se utilizan para identificar el comportamiento de la estufa son: el contenido de humedad del combustible, el tamaño del combustible, el tamaño de la olla y el dispositivo de ignición. Los resultados que se pueden obtener al evaluar el desempeño de una estufa con estos parámetros en diferentes condiciones pueden ser variables. En estudios realizados con estufas mejoradas en la India se determinó que al tener un combustible con un alto contenido de humedad da como resultado una menor eficacia en el desempeño de la estufa, un aumento en el factor de emisión de CO y un ligero descenso en el factor de emisión de CO<sub>2</sub>. El tamaño del combustible no muestra un resultado con influencia significativa en la eficiencia de la estufa.

Sin embargo, se muestra una influencia significativa sobre las emisiones de CO para el rango de tamaño investigado. El tamaño de la olla no afecta la eficiencia de las estufas durante la prueba. Dos métodos de ignición, el encendido convencional que es del fondo de la estufa y el encendido de la parte superior. En general, las emisiones de CO son significativamente menores en el caso de ignición desde la parte superior en comparación con la ignición convencional (Bhattacharya *et al.*, 2002).

## 2.5 PROTOCOLO – WBT

El protocolo para la evaluación de estufas mejoradas “Water Boiling Test” (WBT, por sus siglas en inglés) es una simulación que se asemeja al proceso de cocción de alimentos. Con base en este método se puede comparar el desempeño de diferentes diseños de estufas utilizando una prueba estandarizada y reproducible con una serie de puntos fuertes y débiles que se deben comprender, como la simplicidad al momento de realizar el WBT y fácil de reproducirla. Mediante esta prueba se puede comprender el desempeño o comportamiento de la estufa y predecir aproximadamente cuanto combustible se va usar durante la cocción. La debilidad de la prueba es su aproximación a la realidad debido a que el método se hace en condiciones controladas. Se deben realizar pruebas con las mismas condiciones para que exista una mínima variación en los resultados y para determinar el comportamiento de la estufa debe haber la presencia de una persona capacitada que analice la información y la compare con la cocción de alimentos en condiciones reales (Bailis *et al.*, 2007). Los procedimientos del protocolo WBT son los siguientes:

- Arranque en frío de alta potencia; porque la prueba comienza con la estufa a una temperatura ambiente. Se utiliza un paquete pre-pesada de combustible que servirá para hervir 5 litros de agua en una olla común. La etapa se da por terminada cuando el agua llega al punto de ebullición. En seguida se reemplaza el agua hervida con una olla de agua fresca a temperatura ambiente para llevar a cabo la continuación de la prueba.
- Arranque en caliente de alta potencia; debido a que la estufa mantiene el calor la fase pasada se lleva a cabo mientras la estufa esté todavía caliente, es el mismo procedimiento que en la primera etapa de la prueba. La segunda etapa nos permite comparar e identificar diferencias de rendimientos entre la estufa cuando esta fría y cuando está caliente.
- La prueba de fuego lento; comienza de igual forma que la fase dos con la estufa caliente. Durante la prueba se debe proporcionar la cantidad de combustible necesario para cocinar a fuego lento o mantener una temperatura menor en 3°C de la temperatura de ebullición durante 45 minutos. Con esta fase se pretende simular el tiempo de cocción de legumbres o leguminosas comunes en gran parte del mundo.

## 2.6 SISTEMA PORTÁTIL DE MEDICIÓN DE EMISIONES (PEMS)

Es un equipo diseñado específicamente para cuantificar emisiones de gases como: CO<sub>2</sub>, CO y PM. Lo que se desea con la recolección de emisiones es cuantificar la cantidad total de contaminación producida por las emisiones de una estufa al entorno. Al interpretar las emisiones se puede dar un diagnostico del desempeño en cuanto a eficiencia de la combustión en la estufa. Este sistema tiene varios componentes entre ellos está la campana que encierra el humo y el extractor que atrae el humo de la estufa. Una sonda

mide la velocidad del flujo de aire lleno de humo. La línea de muestreo y el extractor recolectan una muestra de la concentración de emisiones. (MacCarty, 2008).

El método de campana, consiste en una capucha que se coloca sobre la estufa para capturar las emisiones. Se ha identificado que uno de los problemas al utilizar este método es la mecánica inducida por flujo de aire para cambiar la combustión características de la estufa. Además, algunas emisiones pueden escapar por los lados de la campana. En lo posible no se pueden capturar todas las emisiones bajo ciertas condiciones experimentales (Bhattacharya *et al.*, 2002).

## **2.7 EFECTOS DE LAS EMISIONES SOBRE LA SALUD HUMANA**

En general los seres humanos están expuestos a una mezcla de contaminantes que a una sola sustancia que puede propiciar efectos diversos sobre la salud humana. Esto depende a la diferente composición de los contaminantes del aire, la concentración o dosis y el tiempo de exposición. Los problemas a la salud puede ser leves al inicio como náuseas, dificultad al respirar o irritación de la piel hasta llegar a enfermedades cancerígenas. En mujeres embarazadas se incluyen nacimientos con retraso en el desarrollo de los niños, y reducción en la actividad del sistema inmunológico. Según un modelo de datos epidemiológicos se indica que los sistemas más afectados son el sistema cardiovascular y el sistema respiratorio. Siempre afectando a las funciones de otros órganos (Kampa y Castanas, 2007).

El Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los principales gases de efecto invernadero al igual que otros gases de origen en la energía fósil. Su intenso crecimiento se remota desde la revolución industrial donde el CO<sub>2</sub> es el componente más importante que se emite a la atmosfera. El entendimiento sobre los riesgos del cambio climático ha despertado el interés por los investigadores de eliminar los gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Desde 1989 surgen iniciativas para el secuestro de CO<sub>2</sub> según la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en Kyoto se crea un compromiso por varios países para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 6% establecido en el año de 1990. La CMNUCC señaló que la protección del sistema climático debe realizarse. Con una base de equidad y conformidad por todas las naciones. Teniendo en cuenta responsabilidades comunes pero diferenciadas. Los países industrializados son los que deben encabezar esta iniciativa contra el cambio climático. Fueron históricamente los responsables de la mayor cantidad de emisiones acumuladas (Diao *et al.*, 2003).

Monóxido de Carbono (CO) es definido entre los gases contaminantes al monóxido de carbono o CO como un producto de una combustión incompleta. Desde siempre le vida de los seres humanos ha estado ligada a exposiciones de CO. Remontándonos a la prehistoria cuando el hombre se expone a los productos de la combustión. En la primera medición de los efectos letales del humo de carbón. Se menciona que el humo del carbón es conducido hasta la cabeza y puede producir la muerte. La primera intoxicación por inhalación de CO, fue descrita por Harmant y LeBlanc. Se identificó como una sustancia tóxica del gas de carbón. A parte de los efectos producidos por el envenenamiento de CO, se ha

determinado que el CO puede alterar la percepción sensorial y dar lugar a una discapacidad cognitiva significativa (Lindell *et al.*, 2003).

En cuanto a las partículas en suspensión (PM), este término se lo atribuye a una categoría del aire. Es una mezcla de partículas que varían en tamaños y composición de simple a compleja. Producidas por actividades naturales o antropogénicas. Las partículas se clasifican de acuerdo a su diámetro aerodinámico en tres tamaños que son: partículas ultra finas, menores de 0.1mm, partículas finas, menores de 1mm y partículas gruesas, mayores a 1mm. De acuerdo a su tamaño las partículas determinan donde se van a ubicar o depositar en el tracto respiratorio. Las partículas gruesas pueden localizarse en el tracto respiratorio superior y las partículas ultra finas y finas son capaces de llegar hasta los pulmones alvéolos. El tamaño, la cantidad, su composición y la superficie en partículas son factores importantes para los efectos en la salud humana. La composición en las partículas varía de acuerdo a su tamaño. Partículas gruesas pueden absorber y transferir más cantidad de contaminantes. Sus principales componentes son: metales, compuestos orgánicos, material de origen biológico, iones, gases reactivos y el núcleo de carbono (Kampa y Castanas, 2007).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para fabricar y evaluar el modelo de estufa mejorada T-LUD con los 4 tipos de combustibles el estudio se dividirá en tres etapas. La primera consiste en la fabricación de la estufa siguiendo los principios del diseño básico, la segunda es la preparación de los combustibles y la tercera etapa es la evaluación del desempeño de la estufa con los diferentes combustibles.

#### **3.1 PRIMERA ETAPA; FABRICACIÓN DE LA T-LUD**

Se tomo como referencia los planos del diseño para la estufa gasificador T-LUD Peko-Pe, versión 2008 de Paal Wendelbo, (Anexo 2 y 3). Para la fabricación se debe contar con destrezas en el trabajo con soldadura, la manipulación de herramientas que se utilizan en un taller de herraje como tijeras, alicates, martillos, destornilladores, en especial la soldadura eléctrica y contar con algo de imaginación para ensamblaje de la estufa (Imagen de la T-LUD ya fabricada, Anexo 4). El material del que está elaborada la estufa es 100% metal (lamina de acero). Puede ser galvanizado, acero inoxidable, hierro entre otros. Dependiendo de la calidad y durabilidad que se desee o de la disponibilidad económica que se tenga existe la opción de hacer T-LUD con materiales reciclados. Como por ejemplo latas de pintura, de leche, entre otros. Materiales que dan los mismos resultados a un bajo costo pero con menos durabilidad.

#### **3.2 SEGUNDA ETAPA; COMBUSTIBLE EN T-LUD**

Las dimensiones del material que se va usar como combustible en las estufas T-LUD son un factor que influye en la combustión inicial. Permitiendo el ingreso y circulación de forma ascendente del oxígeno primario. Los diferentes materiales utilizados en la evaluación tienen dimensiones de 1.5 a 3 cm de diámetro y longitudes de 3, 5 y hasta 10 cm logrando una informalidad en el tamaño del material. Un aspecto importante para la combustión es la humedad del material, por esta razón se debe mantener almacenado en un ambiente con baja humedad. En los siguientes párrafos se describen los tipos de combustibles utilizados durante este estudio:

- Viruta de Pino; por un bajo costo o con algo de esfuerzo físico se pueden obtener materiales de desperdicio de una carpintería, ramas gruesas, arbustos o productos de poda. Para reducir su tamaño uniformemente se utilizó una picadora agrícola. Posteriormente se procedió a colar el material obteniendo medidas más homogéneas (Anexo 5A).
- Ramas de Pino; para dar un aprovechamiento más completo de los recursos forestales una alternativa como combustible en estufas T-LUD, son las ramas de árboles o arbustos. Se recolectaron ramas de pino, se retiró las acículas y por último se quebró la rama dejando una medida estándar (Anexo 5B).
- Olote; es un residuo agrícola que se lo puede aprovechar como una alternativa al uso de la leña. Para su preparación se utilizó una picadora agrícola y un colador con el objetivo de uniformizar más el material (Anexo 6A).
- Cáscara de arroz; es un residuo agrícola que se lo puede obtener como un subproducto del cultivo del arroz, a este material no se le dio ninguna preparación solamente se almacena en un lugar donde no se vea afectado el porcentaje de humedad del material (Anexo 6B).

### **3.3 TERCERA ETAPA; EVALUACIÓN DE ESTUFA T-LUD**

Para evaluar el desempeño y medir la cantidad de emisiones en estufas mejoradas se han desarrollado protocolos que siguen una serie de normas estandarizadas aplicables para la mayoría de estufas en el mundo. Con el propósito de ayudar a los diseñadores de estufas a comprender bien como se transfiere la energía del combustible a la olla y así realizar mejoras en los diseños desarrollando estufas más eficientes.

Una excepción al protocolo WBT son los diseños de las estufas T-LUD en el cual la cantidad de combustible agregada al inicio determina el tiempo total de cocción y de la prueba. Por esta razón no se pueden aplicar este protocolo en estufas T-LUD sin antes realizar las modificaciones respectivas a la prueba. Una vez adaptados los cambios en la prueba de acuerdo al diseño de una estufa gasificadora se pueden efectuar las pruebas.

La prueba para estufas T-LUD, utiliza solo la primera fase del protocolo WBT donde la estufa debe estar fría y consiste básicamente en hervir 5 litros de agua en una olla sin tapa con un entorno controlado. Para cumplir con este parámetro el estudio se realizó en el Centro de Certificación de Estufas Mejoradas que se encuentra en el módulo de forestales. En total se llevarán a cabo 3 pruebas de 3 repeticiones con tres tipos de combustibles, viruta de pino, ramas de pino y olote.

Con efecto de tener una prueba confiable y lo más parecida a las demás. Se deben cumplir con las siguientes actividades:

- Asegurarse que cuenta con la cantidad suficiente de combustible para realizar el número de repeticiones necesarias.
- Verificar que todo el combustible tenga un tamaño y contenido de humedad uniforme.
- Realizar las pruebas con un mismo tipo de olla, porque puede existir una variación en los resultados al usar ollas con diferentes superficies, influyendo en la llegada al punto de ebullición.

Antes de comenzar con WBT modificado para la estufa T-LUD se debe hacer una serie de preparativos. Alistando a la estufa, el equipo de medición de emisiones y los diferentes materiales que servirán para la tomando los datos previos al inicio de la prueba.

Al llenar la cámara de combustión se debe tomar en cuenta una separación de 2 cm de altura de la orilla del cilindro al material de combustión. El objetivo es dejar un espacio suficiente para que tome lugar el aire y se de la mezcla con los gases. Produciendo una llama azul anaranjada característica de este proceso. El color azul que es distintivo de un fuego producido entre la quema de gases y el color naranja que es generado por la quema de leña o cualquier otro tipo de material inflamable. La cantidad de materia prima dependerá de la capacidad de la cámara de combustión.

Se deben tomar una serie de datos utilizando una balanza digital de marca OHAUS, modelo V21PW15 se pesara una carga de combustible de entre 900 g a 1,200 g, se deberá tomar el peso de la olla vacía y de la biomasa que se va usar en la prueba (residuos agrícolas o forestales). Con un termómetro digital marca Fluke, modelo 51 se registraran los grados de temperatura ambiente y del agua. El porcentaje de humedad de cada combustible es el promedio de 3 mediciones tomadas con un medidor de humedad de marca EXTECH, modelo MO250.

El equipo que se usa para la medición de emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y PM es el “Portable Emissions Monitoring System” (PEMS, por sus siglas en inglés). Equipo que es desarrollado por el “Aprovecho Research Center” es una institución fundada en el año de 1976 con el objetivo de presentar asistencia técnica a los proyectos de estufas mejoradas en varios países. Aportando a la comunidad internacional con publicaciones de manuales y artículos sobre la fabricación de estufas mejoradas y como evaluar el desempeño de las estufas en laboratorio y campo (Anexo 7).

Para la calibración del equipo (PEMS) se toma una muestra limpia de 8 a 10 minutos con el propósito de estabilizar el sistema e impedir la influencia de resultados de pruebas pasadas. Asegurando una prueba más confiable y con resultados más aceptables que permitirán evaluar a la estufa.

El inicio de la prueba de Arranque en frío; al pasar los 8 a 10 minutos reglamentarios para el uso del equipo PEMS se procede a encender el combustible. El material extra utilizado es una rama de ocote de 5 g y 5 ml de diesel. Una vez encendida se apunta ese tiempo como el de inicio de la prueba. Durante el transcurso de la prueba la persona encargada debe monitorear el comportamiento de la estufa y apuntar el tiempo de llegada al punto de ebullición (96.9°C) local. Al terminar la combustión se da por finalizada la prueba y se apunta la hora final de la prueba. A continuación se pesa la olla con agua y la ceniza o el biochar (Anexo 8).

Una vez concluida la prueba la información recopilada por el equipo PEMS se descarga en el ordenador. Los resultados son expuestos en hojas de Excel mediante tablas y figuras, para facilitar interpretación por el usuario.

En el software que interpreta los datos del PEMS, se incluye una lista de valores de poder calorífico, “Gross Calorific Value” (GCV, por sus siglas en inglés) este valor es diferente para cada material. Para elegir el GCV de los combustibles utilizados solo se observo las características del material.

Cuadro 1. Poder Calorífico (kJ/kg) de los combustibles utilizados

<b>Combustible</b>	<b>Poder Calorífico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
Viruta de pino	20,817	kJ/kg	Promedio de madera blanda (coníferas)
Ramas de pino	20,817	kJ/kg	Promedio de madera blanda (coníferas)
Olote	14,700	kJ/kg	Residuos de cosechas

Se eligió a la estufa Inkahuasi para comparar con estufa la T-LUD por que presentan una característica en común al tener un fuego directo, donde el calor pasa directamente a la olla. A diferencia de la T-LUD la estufa Inkahuasi utiliza como principio para la combustión el sistema rocket desarrollado por el Dr. Larry Winiarski. El codo rocket es el nombre dado a la cámara de combustión que se utiliza diferentes modelos de estufas mejoradas. Es un sistema de combustión único, que puede adaptarse a cualquier tipo de aparato, cuya función es producir calor mejorando la eficiencia en consumo de combustible y reducción de emisiones. Otro de los motivos para elegir a la estufa Inkahuasi es su superioridad frente a otros modelos de estufas que utilizan el mismo principio, siendo más óptima en términos de reducción de emisiones en comparación a la estufa Justa 2x3 (Honduras), Onil (Guatemala) y Patsari (México).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 COMBUSTIBLES DE DIMENSIONES PEQUEÑAS CIERRAN EL INGRESO DE OXÍGENO PRIMARIO

La cáscara de arroz no funciona en la estufa T-LUD porque el material cubre todas las superficies diseñadas específicamente para el ingreso de oxígeno primario evitando la combustión inicial. Se intento reducir el cierre de oxígeno primario realizando una mezcla utilizando viruta de pino pero aun así no es suficiente la entrada de oxígeno primario. Eliminando cualquier posibilidad de producir calor y dar el aprovechamiento de esa energía.

### 4.2 DESEMPEÑO DE LA ESTUFA AL USAR EL PROTOCOLO WBT MODIFICADO PARA T-LUD

Durante la prueba se recolectaron una serie de datos (Cuadro 2) importantes para medir el rendimiento de la estufa. La interpretación de esta información permite dar una idea del funcionamiento de la estufa y en lo posible comparar con otras estufas y hacer mejoras. Se obtuvieron los resultados del comportamiento de la estufa al realizar 3 repeticiones de la prueba con cada combustible (Anexo 9-11). En promedio al usar los diferentes tipos de combustibles se determino un tiempo de ebullición (96.9°C) en un rango de 25 a 32 minutos, con cargas de combustible de aproximadamente entre 1kg a 1.1kg con un tiempo de combustión total de 45 a 49 minutos y con una temperatura máxima de 97.33°C al utilizar viruta de pino.

Cuadro 2. Indicadores del desempeño de la estufa T-LUD por cada tipo de combustible

<i>Combustible</i>	<i>Viruta de pino</i>	<i>Ramas de pino</i>	<i>Olote</i>
<b>Humedad del combustible (%)</b>	12	14	15
<b>Peso del combustible (kg)</b>	1.027	1.09	1.03
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	25.10	25.13	24
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	25.83	24.56	24.83
<b>Temperatura máxima del agua (°C)</b>	97.33	97.10	97.06
<b>Peso de la olla con el agua (kg)</b>	4.23	4.63	4.63
<b>Peso del agua final (kg)</b>	3.82	4.23	4.33
<b>Peso de la ceniza o el biochar (kg)</b>	0.13	0.21	0.17
<b>Tiempo punto de ebullición (minutos)</b>	25	28	31.66
<b>Tiempo total de la prueba (minutos)</b>	48.33	47	46.33

### 4.3 EMISIONES TOTALES DE CO<sub>2</sub>, CO Y PM

#### 4.3.1 Emisiones de CO<sub>2</sub> por combustible evaluado

Al realizar las tres pruebas con cada tipo de combustible se determinaron el total de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM.

En promedio se identifico que al utilizar viruta de pino se tiene una emisión de 1,096 g/kg de CO<sub>2</sub>, que es alta en comparación a las ramas de pino y olote con valores de 948 g/kg y 902 g/kg de CO<sub>2</sub> respectivamente. El olote y las ramas de pino presentan una variación significativa siendo iguales en un punto determinado. (Figura 1).

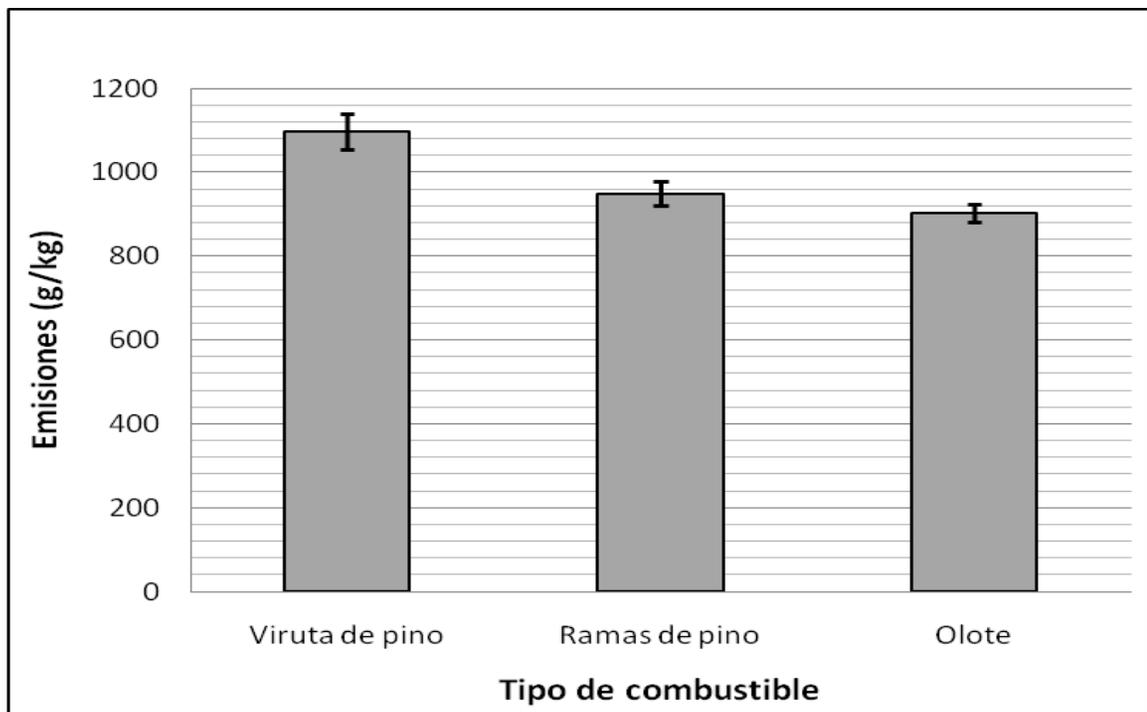


Figura 1. Promedio de emisiones de CO<sub>2</sub> por combustible en T-LUD

#### 4.3.2 Emisiones de CO por combustible evaluado

En lo que respecta a las emisiones de CO las ramas de pino tienen en promedio 66 g/kg de CO emitido al entorno. Resultando ser un valor alto en comparación a las emisiones al usar viruta de pino y olote. Una gran reducción en las emisiones de CO ocurre cuando se utiliza olote como combustible. Con una cantidad de 42 g/kg de CO, De igual forma la cantidad de emisiones de CO al usar viruta de pino bajas en comparación a las ramas de pino con una concentración de 46 g/kg de CO (Figura 2).

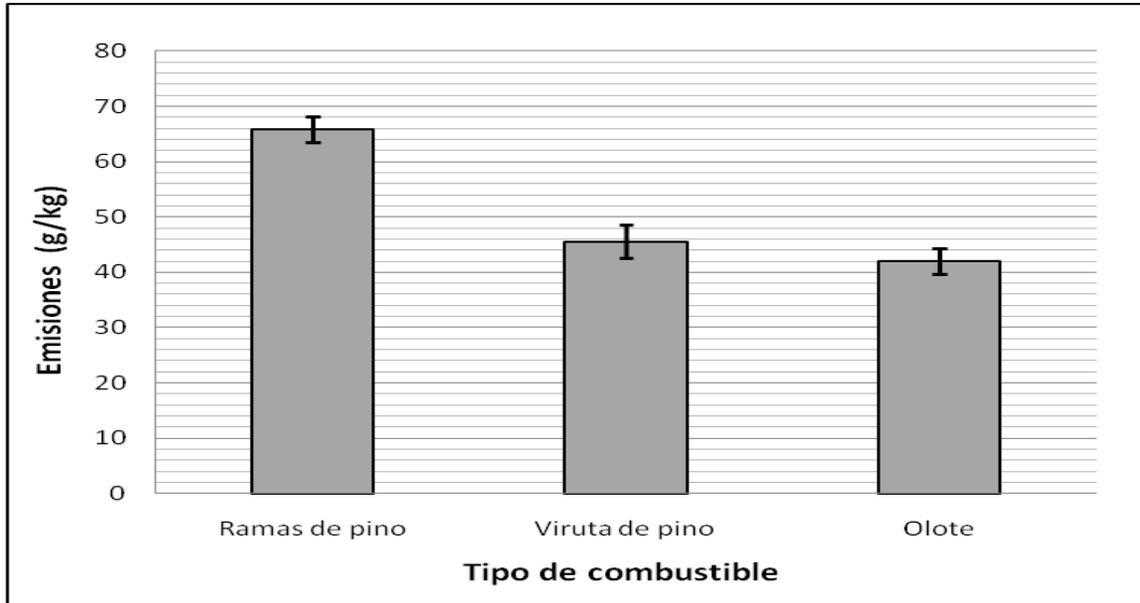


Figura 2. Promedio de emisiones de CO por combustible en T-LUD

#### 4.3.3 Emisiones de PM por combustible evaluado

Se determinó que la cantidad de PM es mayor al usar ramas de pino con una concentración promedio de 4,985 mg/kg de PM. Con menos cantidad de emisiones tenemos valores casi iguales de la viruta de pino y el olote que tienen en promedio 3,434 mg/kg de PM y 3,610 mg/kg de PM respectivamente. Sin embargo los resultados de la emisión de PM al usar olote varía significativamente. Hasta un punto en que se puede igualar la cantidad de emisiones de PM al utilizar ramas de pino, por esta razón no hay una diferencia entre estos dos combustibles (Figura 3).

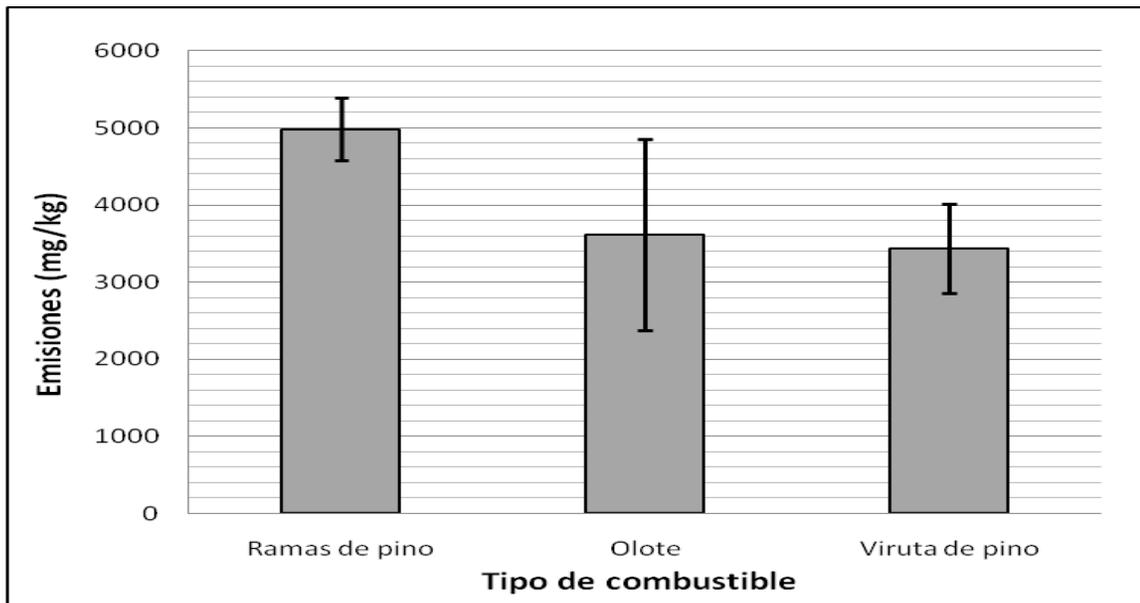


Figura 3. Promedio de emisiones de PM por combustible en T-LUD

#### 4.4 FACTOR DE EMISIÓN (FE) CON LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES

##### 4.4.1 Factor de emisión de CO<sub>2</sub>

En comparación a las ramas y viruta de pino tienen un factor de emisión similar de 1.64 g/g y 1.63 g/g de CO<sub>2</sub> respectivamente. Sin embargo el olote un valora un poco más bajo de 1.56 g de CO<sub>2</sub> por una unidad en gramos de combustible consumido. Sin embargo los resultados son muy variables entre el olote y la viruta de pino, llegando a tener valores iguales. Esto nos indica el factor de emisión no tiene diferencias entre los 3 tipos de combustibles (Figura 4).

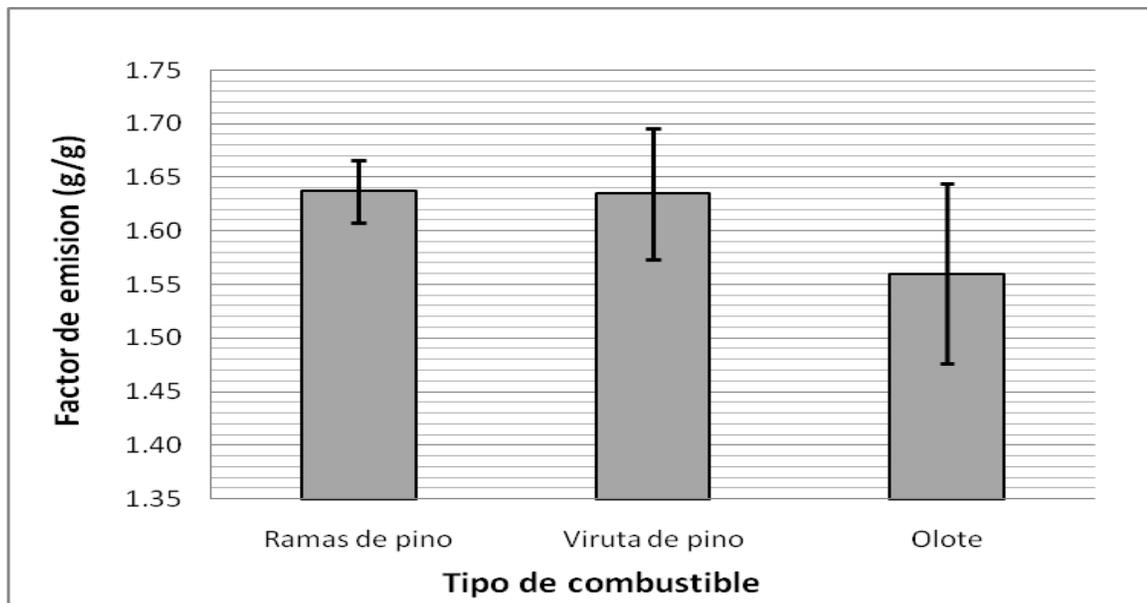


Figura 4. Factor de emisión de CO<sub>2</sub> por cada tipo de combustible

##### 4.4.2 Factor de emisión de CO

El factor de emisión de CO es igual al usar olote y viruta de pino. Determinando que al consumir una unidad en gramos de estos materiales sus emisiones de CO son de 0.07 g. Por el contrario el FE de CO usando ramas de pino es mayor con un valor de 0.11 g/g de CO (Figura 5).

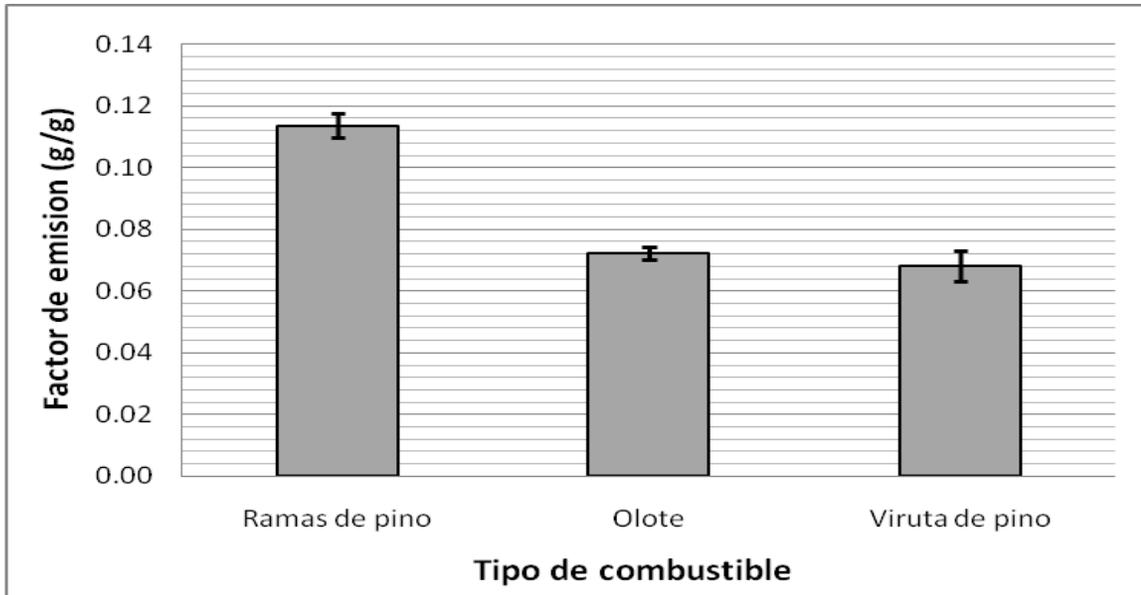


Figura 5. Factor de emisión de CO por cada tipo de combustible

#### 4.4.3 Factor de emisión de PM

La viruta de pino tiene emisiones de 5.09 mg de PM por gramo consumido. Su valor de FE es menor en comparación a las ramas de pino y el olote que tienen FE de 8.60 mg/g y 6.15 mg/g de PM respectivamente. De los tres tipos de combustibles el FE de PM del olote puede variar significativa llegando a igualar el valor de emisiones de PM que se emite cuando se usa ramas y viruta de pino. Por esta razón el olote no tiene diferencias con estos combustibles. (Figura 6).

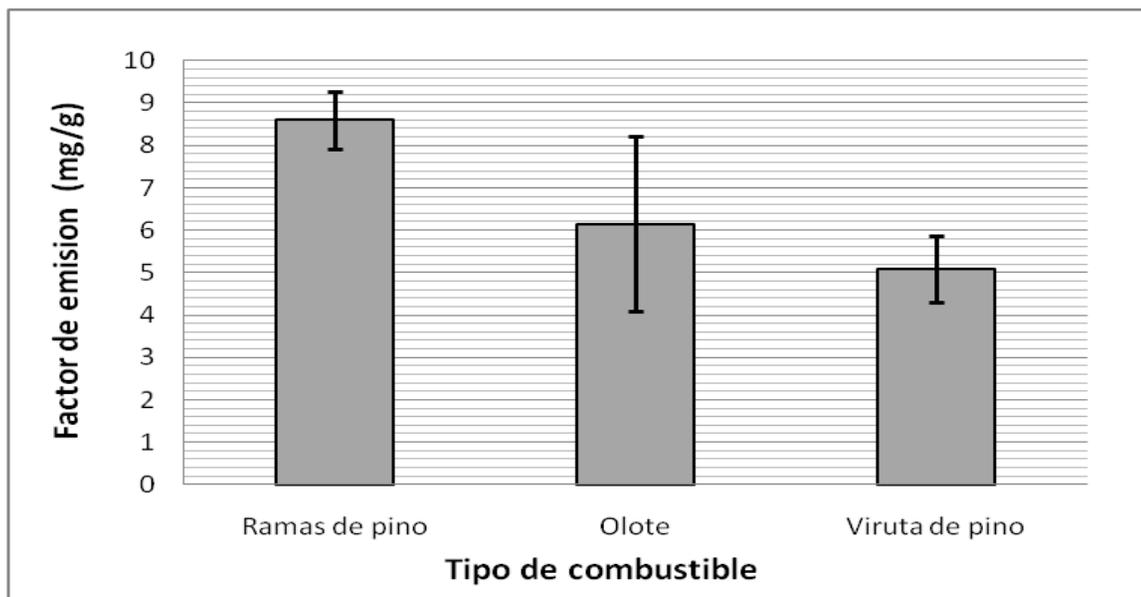


Figura 6. Factor de emisión de PM por cada tipo de combustible

## 4.5 DESEMPEÑO DE LA ESTUFA T-LUD, PEKO-PE

### 4.5.1 Tiempo de Ebullición

Se determino que al utilizar viruta de pino se alcanzo el punto de ebullición a los 25 minutos de haber encendido este combustible. El tiempo alcanzado por la viruta de pino es menor en comparación a las ramas de pino y el olote con tiempos de 28 y 31 minutos respectivamente. Sin embargo, la viruta tiene una variación significativa que iguala al tiempo de ebullición cuando se usa ramas de pino como combustible (Figura 7).

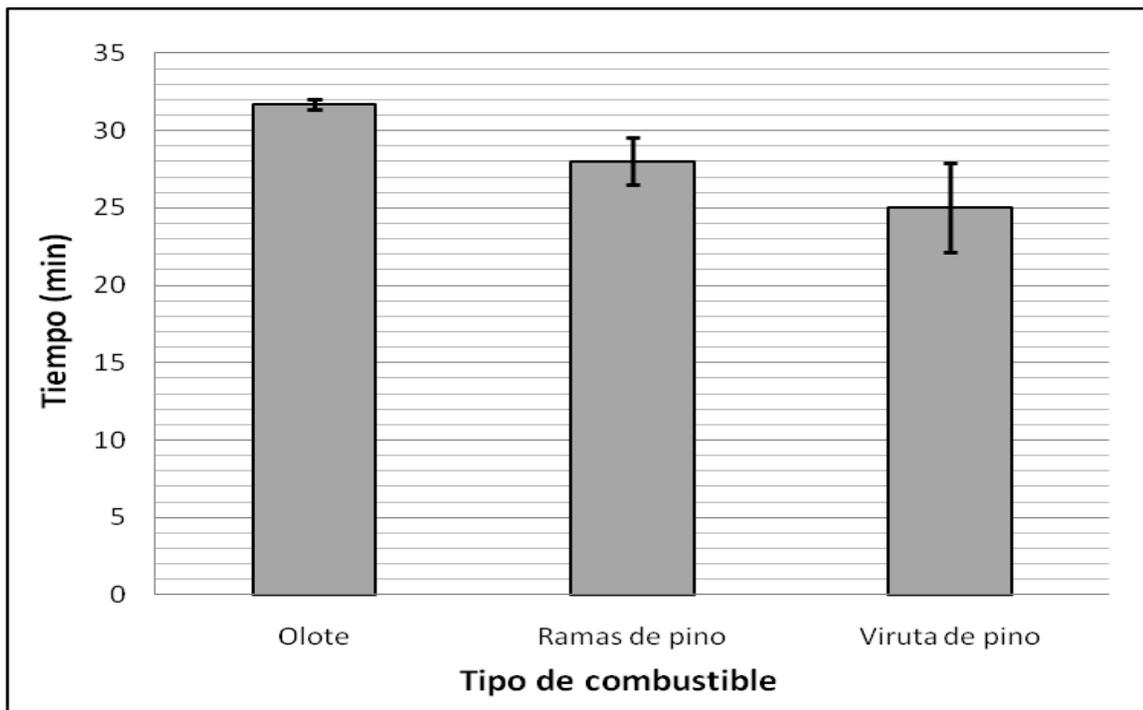


Figura 7. Tiempo de ebullición usando los diferentes combustibles

### 4.5.2 Eficiencia Térmica

El porcentaje de eficiencia térmica del olote es el más alto con un valor de 42% en comparación a las ramas y la viruta de pino que tiene una eficiencia térmica de 29 y 32 % respectivamente. Existe una variación significativa de los resultados al utilizar viruta de pino con una eficiencia térmica que en un punto es igual a las ramas de pino (Figura 8).

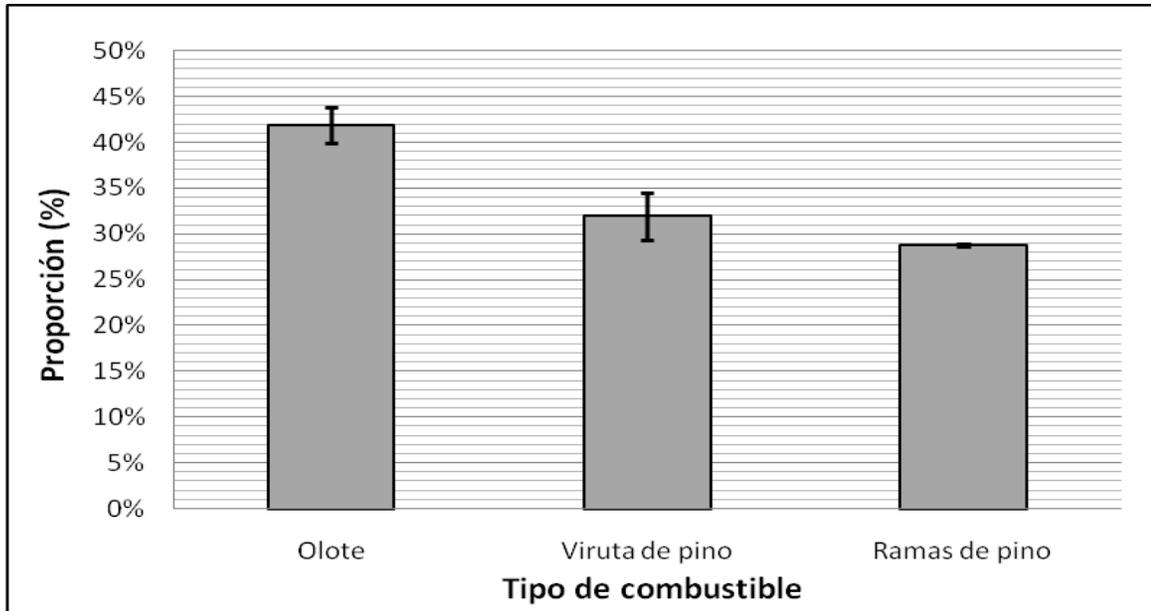


Figura 8. Eficiencia térmica usando los diferentes combustibles

#### 4.5.3 Velocidad de Combustión

La velocidad de combustión más alta es alcanzada por la viruta de pino con un valor de 13.94 g/min. Con una velocidad de combustión muy similar el olote y las ramas de pino tienen valores de 12.60 g/min y 12.34 g/min respectivamente. El olote tiene una variación significativa con relación a la viruta y ramas de pino, llegando a tener en un punto determinado valores iguales (Figura 9).

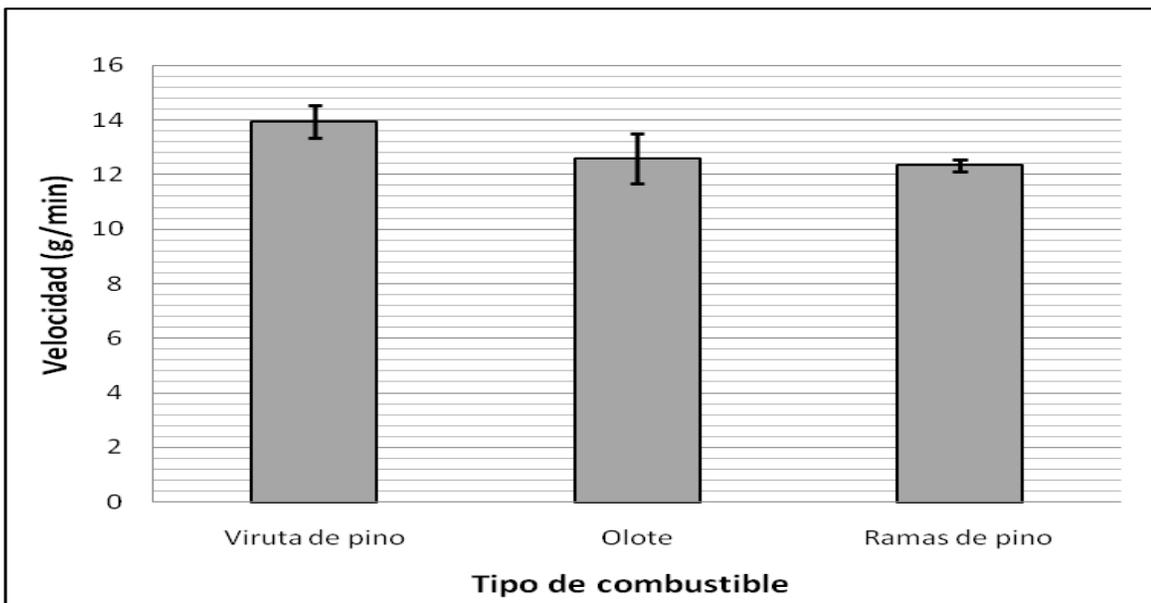


Figura 9. Velocidad de combustión usando los diferentes combustibles

#### 4.5.4 Potencia del fuego

Se determino que el olote tiene una potencia de fuego más bajo con un valor de 2,809 W en comparación a las ramas y viruta de pino con valores de 4,530.93 W y 4,010.10 W respectivamente. Ningún combustible tiene una variación que sea representativa entre sus valores (Figura 10).

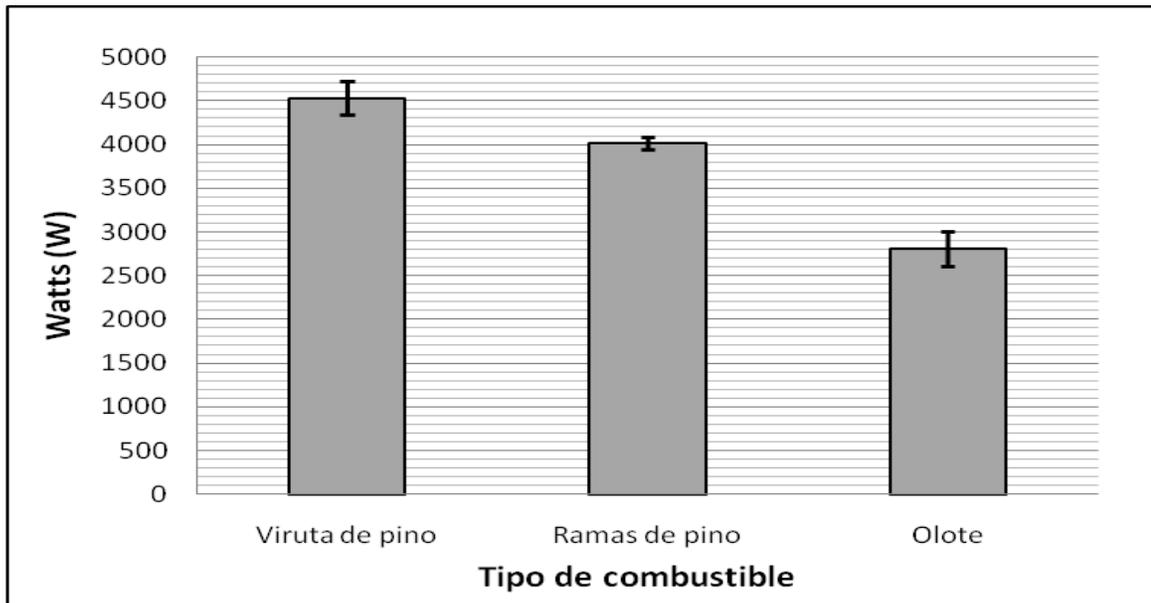


Figura 10. Potencia del fuego usando los diferentes combustibles

#### 4.5.5 Equivalente de Combustible Consumido

El valor más alto de equivalente de combustible consumido lo tiene la viruta de pino con una cantidad de 671 g. Por otra parte las ramas de pino y el olote tienen cantidades casi iguales de 580 g y 580 g respectivamente que representan una reducción en el consumo equivalente del combustible (Figura 11).

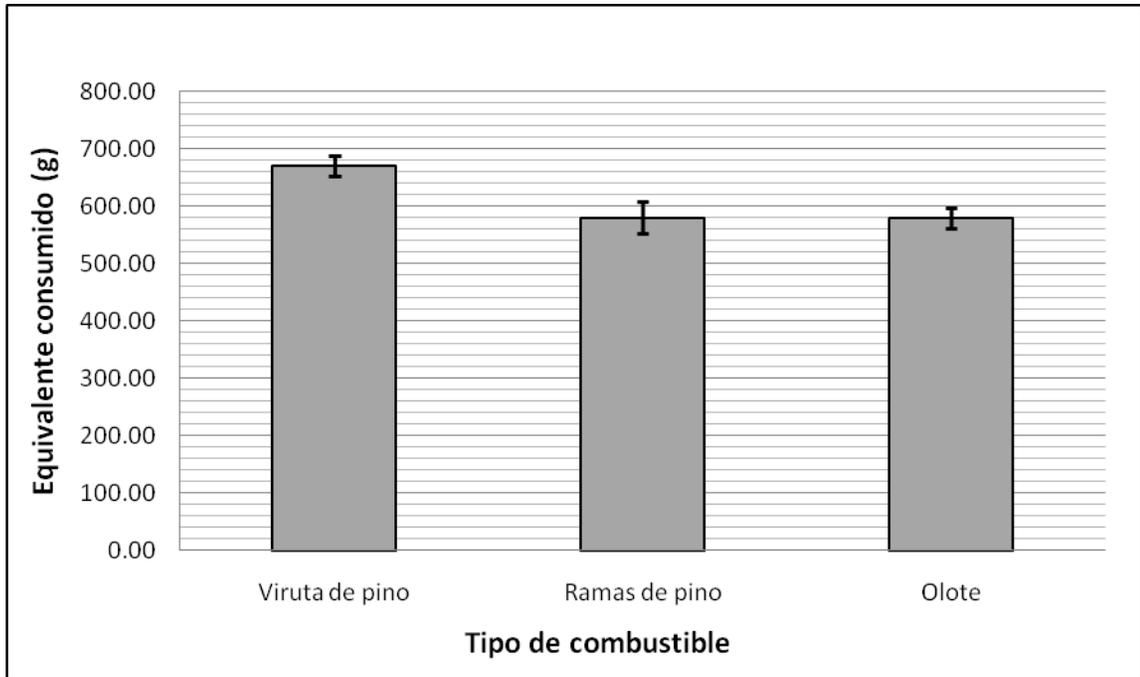


Figura 11. Equivalente de combustible consumido por combustible

#### 4.5.6 Consumo Específico de Combustible

El combustible con mayor consumo específico es la viruta con una cantidad de 174 g/L en comparación con las ramas de pino y el olote que tienen promedios menores de 137 g/L y 136 g/L respectivamente. (Figura 12).

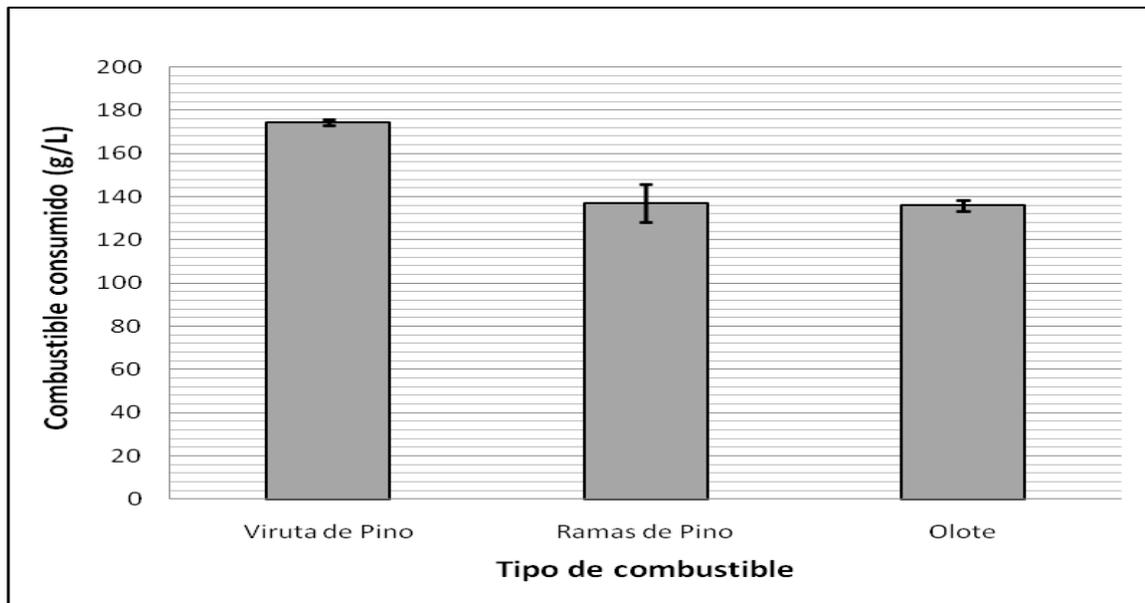


Figura 12. Consumo específico de los diferentes combustibles

## 4.6 CONCENTRACIÓN DE EMISIONES ENTRE LA ESTUFA INKAHUASI Y LA T-LUD, PEKO-PE

### 4.6.1 Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub>

Se determino que las emisiones de CO<sub>2</sub> en la estufa mejorada Inkahuasi usando leña de pino como combustible es de 4,002 g/kg de CO<sub>2</sub>. Representando un valor mucho más alto en comparación a las emisiones en la estufa T-LUD. Con una gran reducción de emisiones al usar los diferentes combustibles como olote, ramas de pino y viruta de pino con valores de 600 g/kg, 529 g/kg, 478 g/kg de CO<sub>2</sub> respectivamente (Figura 13).

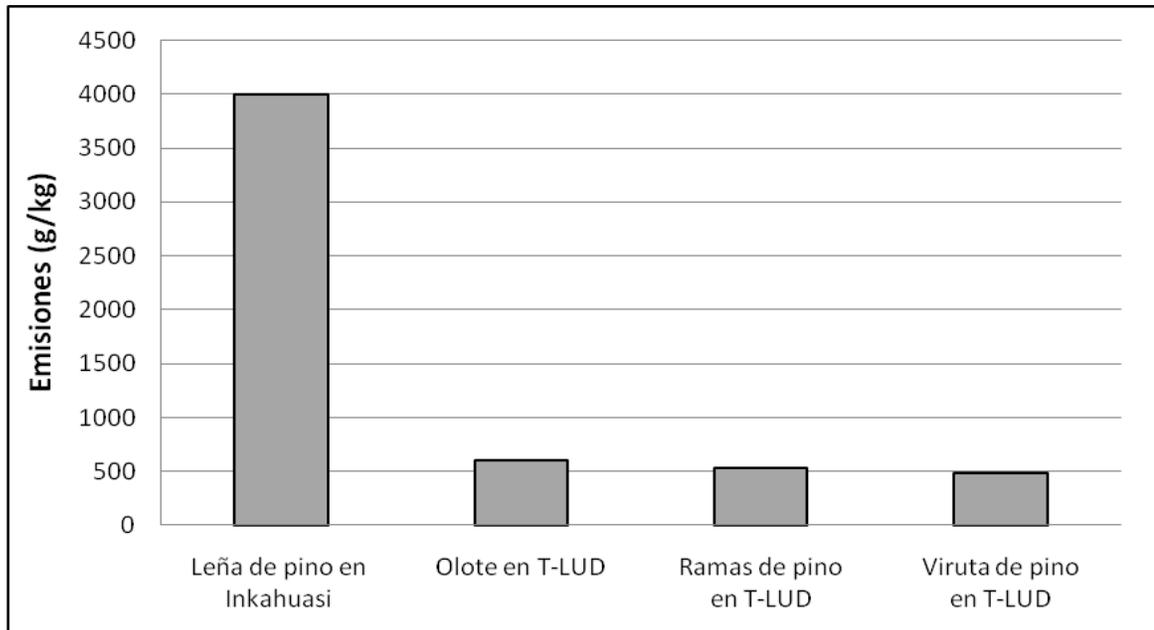


Figura 13. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la estufa Inkahuasi y la T-LUD

### 4.6.2 Comparación de emisiones de CO

Las emisiones de CO son menores en la estufa T-LUD al comparar sus valores con los de la estufa Inkahuasi. En la estufa T-LUD se obtuvieron las siguientes emisiones 38 g/kg, 26 g/kg y 25 g/kg de CO usando ramas de pino, olote y viruta de pino respectivamente. En comparación a la estufa Inkahuasi con 48 g/kg de CO representa una cantidad más alta de emisiones hasta llegar al punto de ebullición (Figura 14).

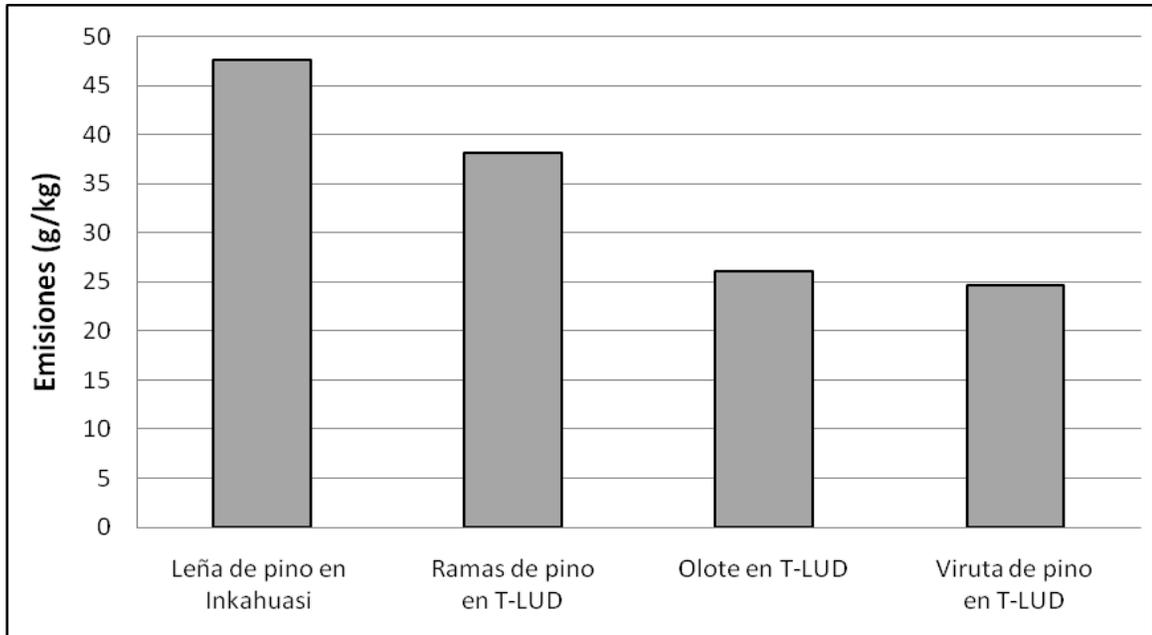


Figura 14. Emisiones de CO en la estufa Inkahuasi y la T-LUD

#### 4.6.3 Comparación de emisiones de PM

Las ramas de pino en la T-LUD con un valor de 2,971 mg/kg de PM se convierten el combustible con mayor cantidad de emisiones de PM. A diferencia de la viruta de pino y el olote que tienen valores menores, de 2,240 mg/kg y 1,611 mg/kg de PM respectivamente. De igual forma la leña de pino usada en la estufa Inkahuasi que obtuvo un valor más bajo de 2,355 mg/kg de PM en comparación a las ramas (Figura 15).

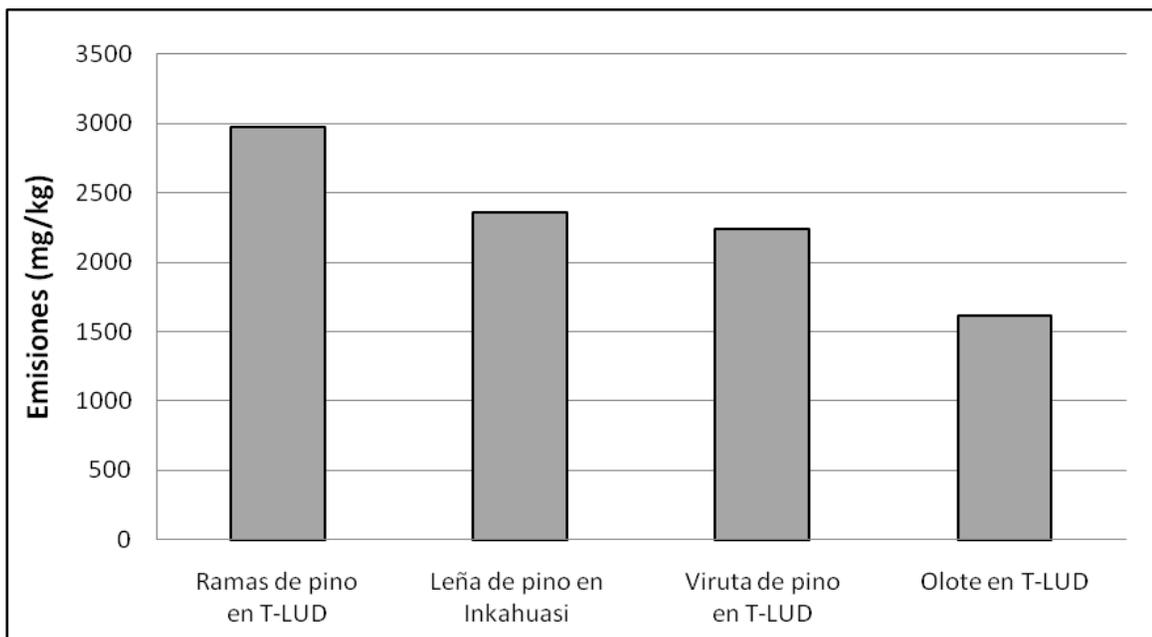


Figura 15. Emisiones de PM en la estufa Inkahuasi y la T-LUD

## 5. DISCUSIÓN

La diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM al usar los tres diferentes materiales puede deberse a la composición química del material. El contenido de resina en las ramas y viruta de pino puede ser un elemento que incremente la cantidad de sus emisiones en comparación a las emisiones de olote que son bajas.

Los resultados del FE nos muestran un valor más real de las emisiones al tomar en consideración la energía requerida para eliminar la humedad del material y la cantidad de combustible que no se quemó. Al comparar los resultados del FE entre los combustibles evaluados se determinó que las ramas de pino tienen mayor cantidad de emisiones de CO y PM al consumir una unidad de combustible. Esto puede ser causado por el porcentaje de humedad en las ramas que debió ser alto impidiendo una combustión más eficiente, evitando que gran parte del material no se quemara y se dejara carbón o ceniza como subproducto.

No existe una amplia diferencia en los indicadores de eficiencia al usar los diferentes tipos de combustibles con excepción de la potencia del fuego con un valor mucho menor al usar olote en comparación con la viruta y las ramas de pino. Esta distinción puede ser por el poder calórico de los materiales, debido a que el de olote es menor en comparación a las ramas y viruta de pino.

La estufa T-LUD en términos de reducción en la concentración de emisiones supera a la estufa Inkahuasi, usando los tres tipos de combustibles olote, ramas de pino y viruta de pino con excepción en las emisiones de PM que son mayores al usar ramas de pino. Esto puede deberse a la composición química de las ramas y su gran cantidad de nutrientes concentrados en la corteza.

## 6. CONCLUSIONES

- Esta comprobado que no se pueden utilizar materiales con dimensiones de 0.5 cm de diámetro y longitudes de 1.5 cm como es el caso de la cáscara de arroz que tiene medidas demasiado pequeñas para ser usadas como combustibles en estufas gasificadoras de tiro natural debido a que se ve interrumpido el ingreso de oxígeno primario y por ende no se produce la combustión inicial.
- La estufa T-LUD tiene un excelente desempeño en lo que respecta a llegada al punto de ebullición con tiempos de entre 25 a 31 minutos para hervir 5 litros de agua a una temperatura ambiente en promedio de 26 °C que es más óptimo en comparación a otras estufas mejoradas como la Justa 2x3, Onil y Patsari .que utilizan el diseño rocket como principio para su fabricación.
- El olote es un residuo agrícola que puede remplazar a materiales como la viruta y ramas de pino que son usados como combustible en estufas que usan un sistema de micro-gasificación. Obteniendo rendimientos similares en la cocción de alimentos y con una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM.
- Es mayor la cantidad de emisiones de CO y PM. Se dieron al usar ramas de pino y de CO<sub>2</sub> usando viruta de pino en la estufa T-LUD.
- No existe una amplia diferencia en los indicadores de eficiencia en la estufa T-LUD usando los diferentes tipos de combustibles. Solo la potencia del fuego es mucho más bajo al usar olote en comparación a la viruta y ramas de pino.
- La estufa T-LUD es más eficiente en reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y PM en comparación a la estufa Inkahuasi utilizando olote y viruta de pino. Con un excepción en las emisiones de PM que son más altas en la estufa T-LUD usando ramas de pino.

## 7. RECOMENDACIONES

- Tomar en consideración las dimensiones correctas de las superficies para el ingreso de oxígeno primario y secundario en el diseños de estufas gasificadoras.
- Calibrar el equipo de evaluación (PEMS) con el tiempo recomendado por el fabricante para que no exista distorsión en la toma de las emisiones (CO<sub>2</sub>, CO y PM).
- Fabricar y evaluar gasificadores con diseños de aire forzado que permitan utilizar combustibles con dimensiones más pequeñas. Un ejemplo es la estufa T-LUD (Belonio) de cáscara de arroz.
- Desarrollar nuevos diseños de estufas en los que se combinen las ventajas del principio rocket y T-LUD.
- Las estufas T-LUD de tiro natural producen carbón vegetal o ceniza como subproductos de su combustión que puede ser aprovechado como fuente de energía o fertilizante orgánico.

## 8. LITERATURA CITADA

Anderson, P. 2009. Planos de construcción para la estufa gasificadora T-LUD “Champion-2008” (en línea). Consultado el 23/05/10. Disponible en <http://www.bioenergylists.org/files/Construction%20Plans%202009-03-11.pdf>

Anderson, P. 2010. Prueba de Anderson para estufa T-LUD, diseño en Camboya 27/04/10 (en línea). Consultado el 24/ 05/10. Disponible en <http://stoves.bioenergylists.org/content/testing-andersons-tl>

Anderson, P; Reed, T; Wever, P. 2007. Micro-gasificación ¿Qué es y por que funciona? (en línea). Consultado el 25/ 05/10. Disponible en <http://www.hedon.info/docs/BP53-Anderson-14.pdf>

Anderson, P; Reed, T. 2004. Gasificación de biomasa: Estufas domésticas limpias, energía comercial y los impactos globales (en línea). Consultado el 23/05/10. Disponible en <http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Anderson/GasifierLAMNET.pdf>

Anderson, P. 2003. EL “Top-Lit Up-Draft-TLUD” Tecnología gasificadora de cocinas mejoradas (ICS) para reducir la contaminación del aire en interiores (IAP) y evitar así infecciones respiratorias bajas (LRI) (en línea). Consultado el 13/09/10. Disponible en <http://lilt.ilstu.edu/psanders/juntos.html>

Anderson, P. 2009. Interpretación de las emisiones de CO y PM, Datos de estufas gasificadoras T-LUD (en línea). Fundación de Energía de Biomasa, conferencia de ETHOS. Consultado el 05/09/10. Disponible en <http://www.bioenergylists.org/andersontludcopm>

Bhattacharya, S; Albina, P; Khaing, A. 2002. Efectos de los parámetros seleccionados en el rendimiento y la emisión de estufas de biomasa (en línea). Biomasa y Bioenergía. p. 387-395.

Bailis, R; Ogle, D; MacCarty, N; Still, D; Smith, R; Rufus, E. 2007. La Prueba de Agua Hirviendo (en línea). Aprovecho Reserch Center Consultado el 29/10/10. Disponible en <http://www.aprovecho.org/lab/pubs/testing>

Bryden, M; Still, D; Scott, P; Hoffa, G; Ogle, D; Bailis, R; Goyer, K. 2006. Principios del diseño para estufas de cocción con leña, Centro de Investigación Aprovecho (en línea). Consultado el 26/05/10. Disponible en [http://comunidades.imacmexico.org/c11/IMG/pdf/Spanish\\_Design\\_Principles\\_estufas\\_de\\_leña\\_07-10-06.pdf](http://comunidades.imacmexico.org/c11/IMG/pdf/Spanish_Design_Principles_estufas_de_leña_07-10-06.pdf)

Bhattacharya, S; Albina, P; Salam, A. 2002 Factores de emisión de la madera y el carbón vegetal como combustible de cocinas (en línea). *Biomasa y Bioenergía*. v. 23, p. 453-469.

Diao, Y; Zheng, X; He, B; Chen, Ch; Xu, X. 2003. Estudio experimental sobre la captura de gas de efecto invernadero del CO<sub>2</sub> por el amoníaco (en línea). *Investigación Conversión de Energía y Gestión*. tomo 45, p. 2283-2296.

Ezzati, M; Kammen, D. 2002. Evaluación de los beneficios para la salud de las transiciones en las tecnologías de energía en el hogar en Kenia (en línea). *Política energética DM*. p. 815-826.

Killmann, W. 2007. Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe (en línea). Ed. Estudio FAO: Montes148. (Roma): FAO, 2007. Consultado el 29/05/10. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/009/a0470s/a0470s00.htm>

Kampa, M; Castanas, E. 2007. Efectos sobre la salud humana de la contaminación del aire (en línea). *Contaminación Ambiental*. v. 151, p. 362-367.

Lindell, K; Stephen, R; Weaver T. 2003. Envenenamiento por Monóxido de Carbono (en línea). Informe del Comité Terapia Hiperbárica de Oxígeno. Consultado el 07/09/10. Disponible en <http://www.bayareahyperbarics.com/files/UHMS-Carbon-Monoxide-Poisoning.pdf>

MacCarty, N. 2008. Validación del PEMS (en línea). Aprovecho Reserch Center. Consultado el 08/10/10. Disponibles en [http://stovetec.net/emissions/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=2](http://stovetec.net/emissions/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=2)

Oñate, D. 2006. Gasificación y Biomasa: “Una Simbiosis de Futuro” (en línea). Consultado el 22/05/10. Disponible en [http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art\\_gas\\_026.pdf](http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_gas_026.pdf)

Patel, U; Kumar, B; Badhe, P; Sharma, B; Saha, S; Biswas, S; Chaudhury, A; Tambe, S; Kulkarni, D. 2006. Estimación del poder calorífico del carbón utilizando redes neuronales artificiales (en línea).

Shackleton, C; Madubansi, M. 2004. Cambios en el uso de la leña y la selección de electrificación en las tierras bajas de Bushbuckridge, Sudáfrica (en línea). Consultado el 23/05/10. Disponible en <http://eprints.ru.ac.za/486/1/fuelwood.pdf>

WHO, 2002. Informe Mundial de la salud 2002 (en línea). p. 232. Consultado el 11/09/10. Disponible en [http://www.who.int/whr/2002/whr2002\\_annex14\\_16.pdf](http://www.who.int/whr/2002/whr2002_annex14_16.pdf)

Wendelbo, P; Anderson, P. 2009. Paal Wendelbo y su “Peko-Pe” Top-Lit UpDraft (TLUD) estufa gacificadora (en línea). Consultado el 23/05/10. Disponible en <http://www.bioenergylists.org/wendelbopekope>

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Conceptos básicos

**Poder calorífico (kJ/kg):** es una propiedad importante de cualquier material del que se necesite extraer energía. Este valor nos indica el contenido de energía útil del material. Su valor como combustible es otorgado de acuerdo a su poder calorífico llamado también como calor de la combustión. Se define así a la cantidad de calor que se desprende cuando una unidad de peso de combustible se quema por completo y los productos de la combustión se enfrían a una temperatura estándar de 298 ° k (Patel *et al.*, 2006).

**Factor de emisión (g/g):** se define como el total de emisión sobre el consumo total de combustible. Lo que se desea obtener con esta comparación es la cantidad de emisiones por determinado consumo de combustible. En estufas mejoradas se busca obtener siempre un valor bajo. Siendo cero el resultado más óptimo. Indicando que no existe emisión de acuerdo a una cantidad de combustible (Bhattacharya *et al.*, 2002).

**Tiempo de ebullición del agua (min):** es el tiempo que transcurre para llegar al punto local de ebullición del agua. En este punto la temperatura no sube, no importa si se aplica más calor. En lo que se refiere a estufas mejoradas el punto de ebullición es un indicador que determina si la estufa es capaz de cocinar alimentos (Bailis *et al.*, 2007).

**Eficiencia térmica (%):** es una relación entre el trabajo realizado para el calentamiento y evaporación de agua por el consumo de energía por combustión de madera. Se calcula mediante una estimación de la energía total producida por el fuego que es transferida a la olla para calentar agua (Bailis *et al.*, 2007).

**Temperatura corregida del consumo específico de combustible (g/L):** es la corrección del consumo específico de combustible de acuerdo a las diferentes temperaturas del agua durante el inicio de la prueba. Esto facilita la comparación de la estufa con pruebas realizadas en diferentes días o en diferentes condiciones ambientales. La corrección es un factor simple que normaliza el cambio de temperatura observado durante las condiciones de prueba normal en donde el cambio de la temperatura es de 75 ° C (25 ° C a 100 ° C), (Bailis *et al.*, 2007).

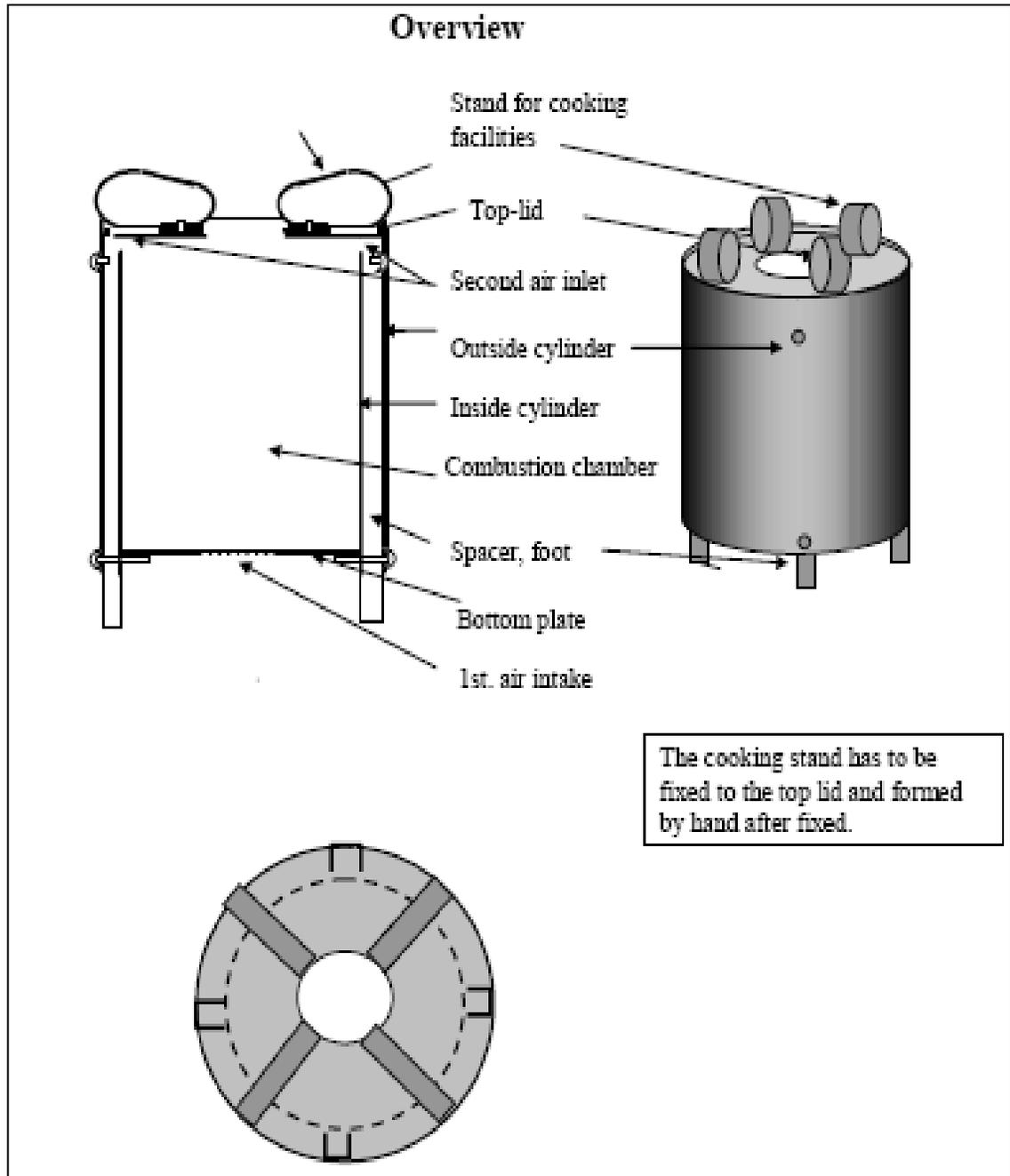
**El consumo específico de combustible (g/L):** es un indicador que determina la cantidad de leña o biomasa utilizada en la combustión para producir una unidad de salida, que se refiere a los diferentes resultados que pueden ser agua hervida, cocción de frijoles o pan. Por ejemplo en el protocolo WBT durante la primera fase de arranque en frío de la estufa el consumo específico de combustible es la medida de la cantidad de madera requerida para producir un litro (o kilo) de agua hirviendo (Bailis *et al.*, 2007).

**Velocidad de combustión (g/min):** es una medida de la tasa de consumo de madera, que es necesaria para llegar al punto de ebullición. Se calcula dividiendo el peso equivalente de la madera seca que se consume en el momento de la prueba (Bailis *et al.*, 2007).

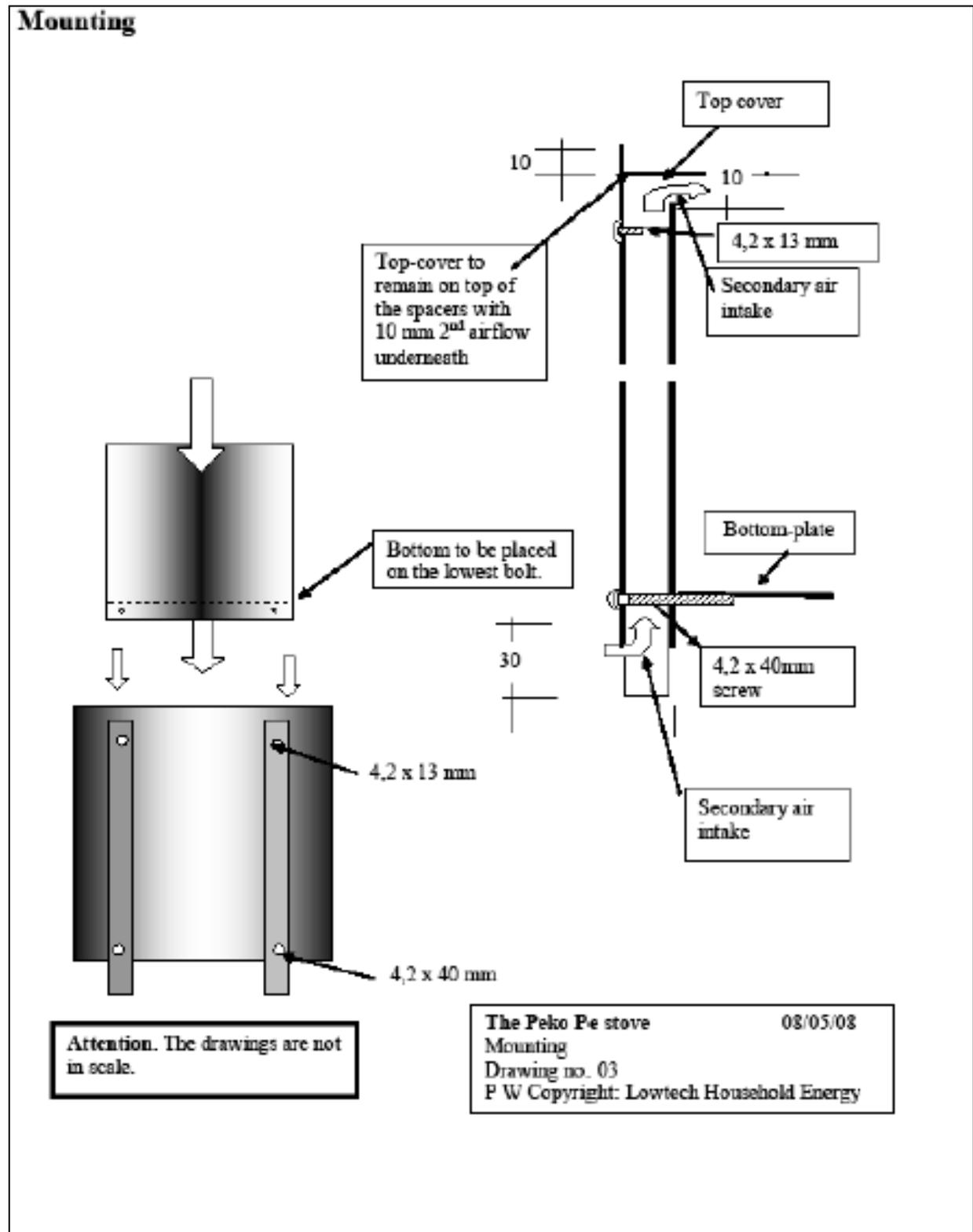
**Potencia del fuego (watts):** es una relación entre la energía de la madera consumida por la estufa sobre una unidad de tiempo. La potencia media de la estufa es medida en vatios (W) durante la prueba de arranque en frío de la estufa o llamada también de alta potencia (Bailis *et al.*, 2007).

**Equivalente de madera seca consumida (g):** es un cálculo que determina la cantidad de madera que se quema. Para obtener este valor se toman en cuenta dos factores: la energía que se necesita para eliminar la humedad de la madera y la cantidad de combustibles restante que no se quemó (Bailis *et al.*, 2007).

## Anexo 2. Diseño de la estufa T-LUD Peko-Pe



## Anexo 3. Forma de ensamblaje de la estufa T-LUD Peko-Pe.



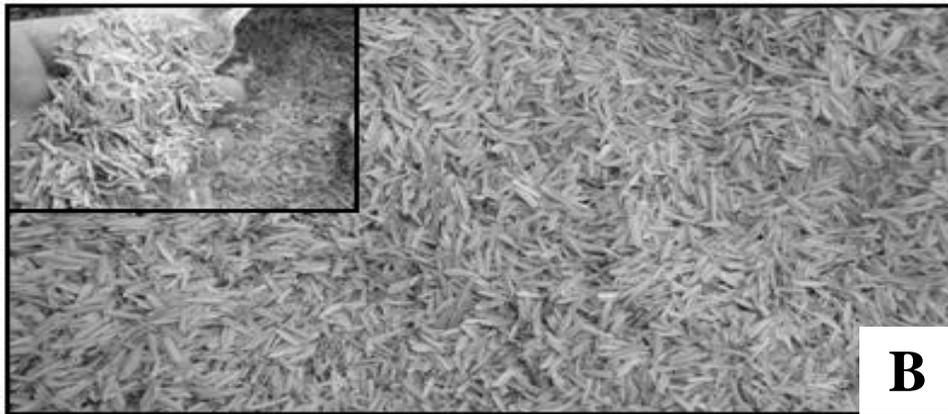
Anexo 4. Estufa gasificadora T-LUD Peko-Pe



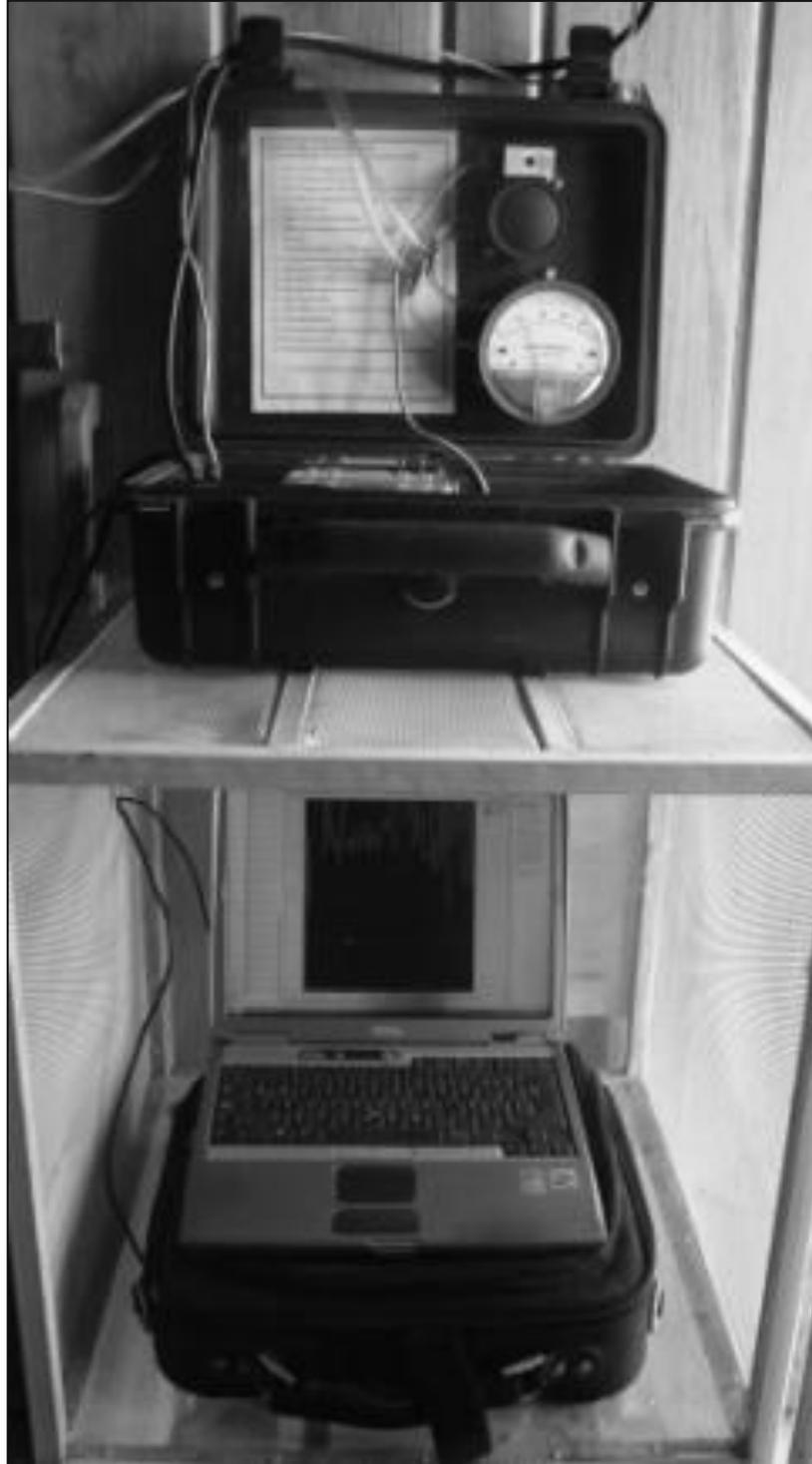
Anexo 5. Residuos forestales, viruta de pino (A) y ramas de pino (B).



Anexo 6. Residuos agrícolas, olotes (A) y cáscaras de arroz (B).



Anexo 7. Equipo para la medición de emisiones-PEMS.



Anexo 8. Cámara de combustión con combustible y con biochar después de la combustión



## Anexo 9. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando viruta de pino.

<b>WBT modificado para T-LUD</b>			
<b>Testeador</b>	Julio Herrera	Julio Herrera	Julio Herrera
<b>Estufa</b>	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe
<b>Fecha de la prueba</b>	18/08/2010	19/08/2010	20/08/2010
<b>Número de prueba</b>	prueba 1	prueba 2	prueba 3
<b>Combustible</b>	viruta de pino	viruta de pino	viruta de pino
<b>Humedad del combustible (%)</b>	10.38	11.90	12.33
<b>Peso del combustible (Kg)</b>	1.010	1.040	1.032
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	24.3	25	26
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	26.3	24.9	26.3
<b>Peso del agua (L)</b>	5	5	5
<b>Peso de la olla (Kg)</b>	0.398	0.402	0.410
<b>Peso del recipiente para biochar (Kg)</b>	0.346	0.346	0.346
<b>Peso material para encender</b>	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote
<b>Tiempo inicial</b>	03:21 p.m.	09:54 a.m.	03:13 p.m.
<b>Tiempo final</b>	04:11 p. m.	10:46 a. m.	03:56 p. m.
<b>Tiempo llegada al punto de ebullición</b>	03:51 p. m.	10:19 a. m.	03:33 p. m.
<b>Temperatura máxima del agua (°C)</b>	97	97	98
<b>Peso de la olla con el agua (Kg)</b>	4.364	4.298	4.028
<b>Peso del agua final (Kg)</b>	3.966	3.896	3.618
<b>Peso de la ceniza o el biochar (Kg)</b>	0.118	0.144	0.154
<b>Tiempo total de la prueba</b>	50 minutos	52 minutos	43 minutos

Anexo 10. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando ramas de pino.

<b><i>WBT modificado para T-LUD</i></b>			
<b>Testeador</b>	Julio Herrera	Julio Herrera	Julio Herrera
<b>Estufa</b>	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe
<b>Fecha de la prueba</b>	18/08/2010	19/08/2010	20/08/2010
<b>Número de prueba</b>	prueba 1	prueba 2	prueba 3
<b>Combustible</b>	ramas de pino	ramas de pino	ramas de pino
<b>Humedad del combustible (%)</b>	14.17	14.18	13.51
<b>Peso del combustible (Kg)</b>	1.198	1.006	1.072
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	24.9	22.0	28.5
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	24.5	25	24.2
<b>Peso del agua (L)</b>	5	5	5
<b>Peso de la olla (Kg)</b>	0.396	0.398	0.408
<b>Peso del recipiente para biochar (Kg)</b>	0.346	0.346	0.346
<b>Peso material para encender</b>	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote
<b>Tiempo inicial</b>	01:07 p.m.	07:42 a.m.	12:59 p.m.
<b>Tiempo final</b>	01:57 p.m.	08:26 a.m.	01:46 p.m.
<b>Tiempo llegada al punto de ebullición</b>	01:32 p.m.	08:11 a.m.	01:29 p.m.
<b>Temperatura máxima del agua (°C)</b>	97.3	97	97
<b>Peso de la olla con el agua (Kg)</b>	4.478	4.724	4.696
<b>Peso del agua final (Kg)</b>	4.082	4.326	4.288
<b>Peso de la ceniza o el biochar (Kg)</b>	0.234	0.188	0.22
<b>Tiempo total de la prueba</b>	50 minutos	44 minutos	47 minutos

## Anexo 11. Resultados del protocolo WBT modificado para T- LUD, usando olote

<b>WBT modificado para T-LUD</b>			
<b>Testeador</b>	Julio Herrera	Julio Herrera	Julio Herrera
<b>Estufa</b>	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe	T-LUD Peko-Pe
<b>Fecha de la prueba</b>	18/08/2010	19/08/2010	20/08/2010
<b>Número de prueba</b>	prueba 1	prueba 2	prueba 3
<b>Combustible</b>	olote	olote	olote
<b>Humedad del combustible (%)</b>	13.97	15.50	15.15
<b>Peso del combustible (Kg)</b>	1.035	1.052	1.020
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	23.1	22.6	26.3
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	24.1	24.8	25.6
<b>Peso del agua (L)</b>	5	5	5
<b>Peso de la olla (Kg)</b>	0.390	0.400	0.408
<b>Peso del recipiente para biochar (Kg)</b>	0.346	0.346	0.346
<b>Peso material para encender</b>	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote	5ml diesel y 5g ocote
<b>Tiempo inicial</b>	09:58 a.m.	08:45 a.m.	02:05 p.m.
<b>Tiempo final</b>	10:41 a.m.	09:31 a.m.	02:55 p.m.
<b>Tiempo llegada al punto de ebullición</b>	10:30 a.m.	09:16 a.m.	02:37 p.m.
<b>Temperatura máxima del agua (°C)</b>	97.2	97	97
<b>Peso de la olla con el agua (Kg)</b>	4.696	4.608	4.612
<b>Peso del agua final (Kg)</b>	4.579	4.208	4.204
<b>Peso de la ceniza o el biochar (Kg)</b>	0.168	0.182	0.172
<b>Tiempo total de la prueba</b>	43 minutos	46 minutos	50 minutos