



Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Química

División de Estudios de Posgrado

Evaluación de la contribución de emisiones y de los parámetros de rendimiento de las estufas eficientes de leña mediante los protocolos WBT/CCT y durante ciclos de cocinado controlado.

TESIS presentada por:
Paulo Cesar Medina Mendoza

Para obtener el grado de:
Doctor en Ciencias en Ingeniería Química

Asesor:
Doctor en Ciencias Marco Antonio Martínez Cinco

Morelia, Michoacán Marzo de 2017

ÍNDICE

Índice	i
Lista de Tablas	iii
Lista de Figuras	iv
Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificación	6
1.3 Alcance	7
1.4 Hipótesis	7
1.5 Objetivos	7
Capítulo 2. Marco Teórico	
2.1 Emisiones de GHG	9
2.2 Proceso de combustión de biomasa	11
2.3 Implicaciones en el uso de IWS	13
2.4 Protocolos de evaluación de IWS	15
2.5 Perspectivas	23
Capítulo 3. Metodología	
3.1 Prueba de Ebullición de Agua (WBT)	25
3.1.1 Descripción de estufas	26
3.1.2 Protocolo de evaluación	29
3.1.2.1 Parámetros de rendimiento IWA Tier	30
3.1.3 Medición de emisiones	32
3.1.4 Procesamiento de datos	34
3.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)	38

3.2.1 Descripción de estufas	39
3.2.2 Protocolo de evaluación	40
3.2.3 Medición de Emisiones	42
3.2.4 Procesamiento de datos	43
3.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)	45
3.4 Análisis estadístico de datos	48
Capítulo 4. Resultados	
4.1 Prueba de Ebullición de Agua (WBT)	
4.1.1 Contribución de emisiones de las IWS y TSF	49
4.1.2 Parámetros de rendimiento	52
4.1.3 Desempeño de la estufa ONIL	53
4.1.4 Parámetros de rendimiento IWA	54
4.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)	
4.2.1 Tareas individuales	57
4.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)	
4.3.1 CBC para estufa Patsari, U-type y TSF	60
4.3.2 Rendimiento de la Patsari en CBC y WBT en relación al TSF	61
4.3.3 CBC vs Suma de tareas individuales en estufa Patsari	63
4.4 Discusión de resultados	
4.4.1 Prueba de Ebullición de agua (WBT)	65
4.4.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)	67
4.4.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)	68
Conclusiones	70
Recomendaciones	73
Referencias bibliográficas	75
Apéndices	85

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
Tabla 2.1	Potencial de calentamiento de los diferentes contaminantes emitidos durante la combustión de biomasa.	10
Tabla 3.1	Rango de valores de los parámetros IWA Tier en energía, emisiones totales y emisiones al interior.	31
Tabla 4.1	Contribución de emisiones de las IWS y TSF durante las fases de alta y baja potencia.	50
Tabla 4.2	Parámetros de rendimiento de las IWS y TSF para ambas fases de la prueba WBT.	52
Tabla 4.3	Comparación del rendimiento energético y de emisiones de la estufa ONIL.	53
Tabla 4.4	Valores Tier para los parámetros de rendimiento IWA de las estufas tipo plancha y TSF.	56
Tabla 4.5	Parámetros de rendimiento y contribución emisiones de la estufa Patsari y U-type durante las tareas individuales.	59
Tabla 4.6	Parámetros de rendimiento y contribución de emisiones para la estufa Patsari, U-type y TSF durante ambos ciclos de cocinado.	61
Tabla 4.7	Rendimiento de la estufa Patsari mediante diferentes niveles de comparación.	64

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura 1.1	Producción mundial de energía primaria, 2014.	1
Figura 1.2	Producción de energía primaria en México.	2
Figura 3.1	Diagrama de flujo de la metodología del protocolo WBT.	25
Figura 3.2	Estufas evaluadas: Ecostufa, Mera-Mera, Patsari Portátil, TSF, ONIL y Patsari.	27
Figura 3.3	Estufa ONIL: A. Superficie del comal principal, B. Área de la plancha sin anillos.	28
Figura 3.4	Configuración de medición de emisiones utilizando el PEMS durante las pruebas WBT.	33
Figura 3.5	Esquema metodológico del protocolo CCT.	38
Figura 3.6	Estufas evaluadas durante las pruebas CCT: (A) estufa Patsari y (B) U-type.	39
Figura 3.7	Estufas evaluadas durante el CBC: Patsari, U-type y TSF.	46
Figura 4.1	Factores de emisión de PM _{2.5} y MCE para las IWS y TSF.	51
Figura 4.2	Valores Tier para emisiones durante la fase de alta potencia para las IWS y TSF.	55
Figura 4.3	Valores Tier para emisiones durante la fase de baja potencia para las IWS y TSF.	55
Figura 4.4	Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación al U-type durante las tareas individuales CCT.	58
Figura 4.5	Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación al TSF durante el CBC y WBT.	62
Figura 4.6	Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación a la misma estufa durante el CBC y la Suma de tareas individuales.	63

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haber financiado mis estudios de Doctorado y hacer posible este trabajo de tesis.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por darme la oportunidad de realizar mis estudios desde el Bachillerato hasta ahora.

A la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) y al Posgrado de Ingeniería Química por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Licenciatura, Maestría y Doctorado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por otorgarme un espacio de trabajo para la realización de las pruebas experimentales de este trabajo de investigación.

Al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) y al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (GIRA) por haber suministrado el equipo de medición y los recursos humanos y de infraestructura para la realización de las pruebas experimentales.

Al Dr. Omar Masera Cerutti quien fue el artífice en la concepción de este estudio, así como un inmenso apoyo para la publicación del artículo de investigación.

Al Dr. Marco Martínez Cinco por asesorar y enfocar las piezas medulares de este proyecto de tesis.

Al Dr. Víctor Berrueta Soriano por sus valiosas contribuciones para la interpretación de los resultados de este estudio y del manuscrito publicado.

Al Dr. Rafael Huirache Acuña por sus valiosos comentarios y aportaciones para la mejora continua de este trabajo durante los Seminarios de Investigación.

Al Dr. Agustín Jaime Castro Montoya y al Dr. José Apolinar Cortes por su retroalimentación a lo largo de las Presentaciones de Avances de este proyecto de tesis.

Al Ing. Enrique Riegelhaupt, al Dr. Morgan Bailey, al Dr. Oscar Peralta Rosales y al M.C. Juan Pablo Gutiérrez Llerenas de quienes aprendí conocimientos invaluable los cuales me permitieron entender e interpretar los resultados experimentales de este estudio.

Al M.C. Víctor Ruíz García, por su apoyo durante la realización de las pruebas experimentales así como en la interpretación de los resultados de esta investigación.

Resumen

En este trabajo de tesis se utilizó la Prueba de Ebullición de Agua (WBT, por sus siglas en inglés) para evaluar la contribución de emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM_{2.5}) así como los parámetros de rendimiento de 5 estufas tipo plancha y un fogón de 3 piedras (TSF, por sus siglas en inglés) en condiciones de laboratorio. Por otra parte, se aplicó la Prueba de Cocinado Controlada (CCT, por sus siglas en inglés) para comparar el desempeño de la estufa Patsari® y un fogón en forma de U (U-type, por su nombre en inglés) durante el cocinado de seis alimentos típicos de la región rural de Michoacán, México. Finalmente, se diseñó un ciclo de cocinado controlado (CBC, por sus siglas en inglés) para evaluar el desempeño de la estufa Patsari® en relación al U-type y TSF mediante diferentes niveles de comparación. Los resultados de la prueba WBT mostraron que las cinco IWS evaluadas presentan una reducción significativa de emisiones de CO y PM_{2.5} en relación al TSF. En la fase de alto poder, la estufa ONIL® presentó la mayor reducción de CO con 67% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.05$); mientras que la estufa Patsari presentó una reducción del 52% ($p = 0.02$, $\alpha = 0.05$) en emisiones totales de PM_{2.5}. En la fase de baja potencia, las mayores reducciones se observaron en la Ecostufa (67% para CO, $p = 0.01$, $\alpha = 0.05$) y en la estufa ONIL (63% para PM_{2.5}, $p < 0.01$, $\alpha = 0.05$). Por otra parte, los resultados de la prueba CCT mostraron que el rendimiento de la estufa Patsari en relación al U-type depende de las características de cocinado de las diferentes tareas y del uso eficiente tanto de la superficie de transferencia como de la potencia de cocinado lo cual se traduce en una variación en términos de consumo de combustible, tiempos de cocinado y contribución de emisiones de CO y PM_{2.5}. Los resultados del CBC mostraron que la estufa Patsari presentó una reducción de emisiones de CO y de PM_{2.5} con 78% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y 74% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), respectivamente; y ahorros de consumo de combustible del 40% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) en comparación con el TSF.

Palabras clave: IWS, Patsari, TSF, U-type, emisiones.

Abstract

In this thesis study, Water Boiling Tests (WBT) were used, as standard of a cooking task, to evaluate carbon monoxide (CO) and particulate matter (PM_{2.5}) emissions contribution and performance parameters for five improved wood stoves (IWS) relative to a three stone fire (TSF) under laboratory conditions. On the other hand, Controlled Cooking Tests (CCT) were also used to compare Patsari® stove performance relative to a traditional U-shaped open fire (U-type) for the most common practices carried out in the Purepecha Region of Michoacan. Finally, a Controlled Cooking Cycle (CBC) was designed to evaluate Patsari performance against TSF and U-type under different comparison levels.

Results for the WBT showed significant emissions reduction for CO and PM_{2.5} for the IWSs relative to TSF. In the high-power phase, ONIL® and Patsari stoves had the larger emissions reduction for CO and PM_{2.5} with 67% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.05$) and 52% ($p = 0.02$, $\alpha = 0.05$), respectively. In the low-power phase, Ecostufa and ONIL stoves reported (67% for CO, $p = 0.01$, $\alpha = 0.05$) and (63% for PM_{2.5}, $p < 0.01$, $\alpha = 0.05$). Results for the CCT showed that Patsari performance relative to U-type rely on cooking characteristics from the individual tasks. The optimal use from both heat transfer surface and cooking power result as variations in terms of cooking time, fuelwood consumption and CO and PM_{2.5} emissions contribution. Finally, the cooking sequence for the CBC for Patsari stove relative to TSF reported significant emissions reduction and fuelwood savings with (78% for CO, $p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), (74% for PM_{2.5}, $p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) and (40% for Wood savings, $p < 0.01$, $\alpha = 0.01$).

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

1.1.1 Fuentes alternas de energía

La energía renovable se puede definir como un recurso sustentable el cual se puede obtener de diversas fuentes naturales tales como la biomasa, luz solar, aire y agua (Fridleifsson., 2001). El uso de dichas fuentes alternativas es una de las medidas centrales de la política climática mundial para la reducción de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) y la mitigación del cambio climático (Sokka y col., 2016). En la actualidad las fuentes renovables de energía son responsables del 14% de la producción mundial de energía primaria (IEA., 2016) como se puede observar en la Figura 1.1.

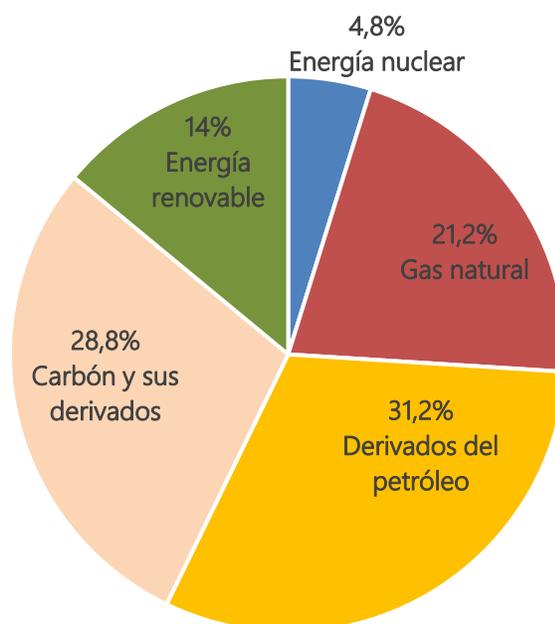


Figura 1.1 Producción mundial de energía primaria, 2014. Balance Energético Mundial, IEA, edición 2016.

1.1.2 Uso de la Biomasa

La biomasa se puede definir como toda materia orgánica la cual almacena energía proveniente de la luz solar mediante enlaces químicos entre moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno (McKendry., 2002a). A nivel mundial, aproximadamente 3 mil millones de personas en todo el mundo dependen de la biomasa como combustible primario para la cocción de alimentos (Martin et al., 2011; Anenberg., 2012). En México, el ~8% de la energía primaria que se produce es a partir de energía renovable, de la cual el 4.36% es a partir de biomasa tradicional (SENER., 2015). Aproximadamente 23 millones de personas en nuestro país dependen de la leña para satisfacer sus necesidades energéticas (Serrano-Medrano y col., 2014).

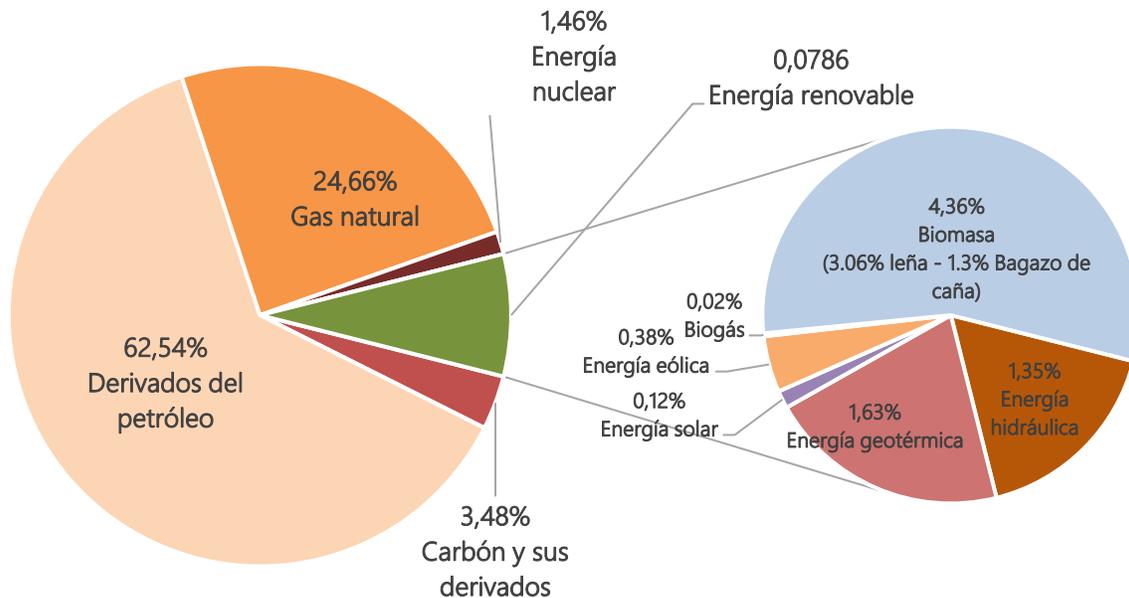


Figura 1.2 Producción de energía primaria en México (SENER., 2015, Sistema de Información Energética).

1.1.3 Aplicaciones de la Biomasa

La biomasa presenta un potencial real para elevar la seguridad energética en regiones sin abundantes reservas de combustibles fósiles y para reducir las emisiones netas de carbono a la atmósfera por unidad de energía suministrada (Field., 2008). Esta fuente de energía renovable puede proporcionar biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos y también ser utilizada para la generación de electricidad, combustibles para el transporte, producción de calor de alta temperatura particularmente para propósitos industriales (IEA., 2012). Aún con las ventajas que presenta el uso de la biomasa para la producción de energía térmica y eléctrica ésta es sólo una de las alternativas renovables que pueden ser utilizadas para reducir los impactos del calentamiento global. Sin embargo, al igual que otras fuentes alternas existen limitaciones sobre el uso y aplicabilidad de la biomasa tales como la disponibilidad de recursos y la eficiencia de los dispositivos donde se utilice (McKendry., 2002b).

1.1.4 Recolección de la biomasa

La recolección de la biomasa es un factor que presenta gran influencia sobre los efectos potenciales del calentamiento global (MacCarty y col., 2008a). Es decir, si la biomasa se recolecta de forma sustentable, el CO₂ liberado debido a la combustión será teóricamente re-absorbido por la biomasa que se encuentra en crecimiento. Sin embargo, si la biomasa no se recolecta de manera sostenible, el CO₂ emitido durante la combustión de la biomasa contribuirá a la acumulación de CO₂ en la atmósfera y al cambio climático (MacCarty y col. 2008a; Beyene y col. 2015). Por otra parte, si la biomasa que se utiliza como materia prima para la producción de energía eléctrica o calor proviene de fuentes sustentables produce menos emisiones netas de CO₂ que los combustibles fósiles por unidad de energía útil entregada (IEA. 2012).

En México la biomasa (leña) para la cocción de alimentos y calefacción proviene primordialmente de árboles, ramas y arbustos muertos (Arias., 1993; Masera., 1995; Masera y col., 1997).

1.1.5 Estufas de biomasa

En diversos países en desarrollo, las estufas tradicionales de biomasa como el fogón de tres piedras (TSF, por sus siglas en inglés) continúan siendo utilizadas para satisfacer necesidades básicas tales como la cocción de alimentos y la calefacción de los hogares. Sin embargo, diversos estudios han mostrado que el uso de dichos dispositivos presenta importantes afectaciones a la salud de los usuarios (Smith., 2003; Smith y Mehta., 2003; Romieu y col., 2009) y al medio ambiente (Johnson y col., 2008). Las estufas eficientes de leña (IWS, por sus siglas en inglés) se definen como dispositivos los cuales optimizan la eficiencia energética y el proceso de combustión con la finalidad de reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, respectivamente, en relación a las estufas de fuego abierto.

Los programas integrales de evaluación y monitoreo de IWS se han desarrollado con múltiples objetivos: la evaluación de la reducción de las emisiones de GHG, los impactos en la salud, las exposiciones personales, las concentraciones de la contaminación del aire en interiores y la mejora en la calidad de vida de las familias (Masera y col., 2005). En las comunidades rurales de México, la biomasa tradicional (leña) se utiliza principalmente para la cocción de alimentos (Berrueta et al., 2008) actividad que se realiza tanto en IWS como en estufas tradicionales de tres piedras y en fogones en forma de U (U-type, por sus siglas en inglés).

Entre 2007 y 2012 se difundieron más de 600 mil estufas eficientes a través del Programa Nacional de Estufas de Leña (Berrueta., 2014). La distribución de las IWS tipo plancha¹ se ha llevado a cabo en diversos estados de México tales como Guerrero, Michoacán, Chiapas, Oaxaca, Sinaloa y San Luis Potosí siendo las estufas Patsari® y ONIL® las estufas con el mayor número de dispositivos distribuidos con 200,000 y 90,000, respectivamente, (Medina y col., 2017).

¹ El término "plancha" es comúnmente utilizado para referirse a la superficie circular o rectangular de las IWS donde se lleva a cabo la cocción de alimentos. Tradicionalmente también se le denomina "comal".

1.2 Justificación

El cambio climático mundial ha sido consecuencia en gran medida debido al excesivo uso de combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética de las sociedades contemporáneas. Para hacer frente a este problema de carácter global los principales países del mundo han dado apertura a una transición hacia el uso de energía renovable. En este sentido, las estufas eficientes se han difundido en diversos países en desarrollo con múltiples objetivos dentro de los cuales se encuentra optimizar el proceso de combustión y con ello disminuir la emisión de GHG en comparación con el uso de estufas de fuego abierto. En México la difusión de las IWS se ha llevado a cabo a lo largo del territorio nacional, sin embargo, la gran mayoría de dichas estufas no cuentan con una evaluación técnica la cual muestre el rendimiento de esta tecnología. Actualmente, existe poco conocimiento de la efectividad de las IWS en la reducción de emisiones contaminantes y en el ahorro de combustible respecto al dispositivo tradicional. Por tal razón, en este trabajo de tesis se determina la contribución de emisiones² así como los principales parámetros de rendimiento³ de las IWS en comparación con estufas tradicionales bajo diferentes escenarios de evaluación.

² La contribución de emisiones obtenida en este estudio se refiere a la estimación de emisiones totales (emisiones que se liberan al medio ambiente tanto de las IWS como del fogón tradicional) de monóxido de carbono (CO) y de material particulado menor a 2.5 μm (PM_{2.5}).

³ Los parámetros de rendimiento incluyen para el caso de la Prueba de Ebullición de Agua (consumo específico de combustible, eficiencia térmica, potencia y tiempo de ebullición). Mientras que en el caso de las Pruebas de Cocinado Controlado y de ciclo de cocinado controlado se estimaron (consumo de combustible, consumo específico de leña y tiempos de cocinado).

1.3 Alcance

El presente trabajo de investigación representa un importante aporte al estado del arte actual de las IWS tipo plancha y se encuentra limitado a la evaluación de la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} así como de los parámetros de rendimiento de cinco IWS en relación al TSF mediante Pruebas de Ebullición de Agua (WBT, por sus siglas en inglés), de la estufa Patsari respecto al U-type mediante Pruebas de Cocinado Controlado (CCT, por sus siglas en inglés) y de la Patsari respecto al U-type y al TSF durante un ciclo de cocinado controlado (CBC, por sus siglas en inglés).

1.4 Hipótesis

- La reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} de las estufas eficientes tipo plancha en relación al fogón tradicional es mayor durante un ciclo de cocinado que la obtenida tanto en Pruebas de Ebullición de Agua (WBT) como en Pruebas de Cocinado Controlado (CCT).

1.5 Objetivos

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} así como los parámetros de rendimiento de las estufas eficientes de leña respecto al fogón tradicional mediante la aplicación de los protocolos WBT/CCT y durante un ciclo de cocinado controlado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar las principales estufas eficientes de leña difundidas en México para determinar los parámetros de emisiones y el rendimiento energético mediante Pruebas de Ebullición de Agua (WBT).
- Evaluar el rendimiento de la estufa Patsari en relación al fogón tradicional durante la preparación individual de alimentos típicos de la región rural de Michoacán.
- Diseñar una secuencia de cocción de alimentos la cual simule el uso de la estufa Patsari durante un día normal de cocinado de un hogar rural.

Capítulo 2

Marco Teórico

Es necesaria la medición y cuantificación de las emisiones provenientes de estufas tradicionales de fuego abierto y compararlas con las IWS para poder estimar los beneficios que éstas últimas tienen, en términos de la mitigación a los efectos del calentamiento global (Smith y col., 2000b; Edwards y col., 2004). En este sentido, diversas investigaciones sugieren que la instalación de estufas con mejoras energéticas y de eficiencia de combustión sobre los dispositivos tradicionales, podrían potencialmente ayudar a mitigar efectos adversos para la salud humana, energía y consecuencias climáticas (Smith., 1994).

En este Capítulo, se definen conceptos clave para el entendimiento en general de los resultados de este trabajo de investigación. Adicionalmente, se hace mención a diversos estudios en los cuales se sitúa el Estado del Arte de las estufas eficientes referente a emisiones de GHG, el fenómeno de combustión de biomasa, implicaciones en el uso de IWS y a los protocolos de evaluación de las mismas.

2.1 Emisiones de GHG

La emisión de GHG proviene de diferentes fuentes de contribución las cuales podemos englobar en dos grandes rubros: antropogénicas y naturales. Las fuentes antropogénicas incluyen fuentes fijas y móviles tales como: la generación de energía eléctrica, el sector transporte, los procesos industriales, la quema de combustibles fósiles en el sector residencial y las actividades en el sector agrícola (US EPA., 2017).

Dentro de las fuentes naturales de emisión de GHG encontramos la quema de biomasa (UNEP y CCAC., 2016) para la generación de energía térmica para distintos fines tales como la cocción de alimentos y calefacción. La importancia de cuantificar los contaminantes emitidos en la combustión de biomasa en el sector residencial radica en que dichos gases contaminantes presentan un potencial de calentamiento el cual tienen implicaciones en el cambio climático mundial (MacCarty y col., 2008a). Dentro de los productos de la combustión incompleta (PICs, por sus siglas en inglés) generados por la combustión de biomasa encontramos al monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), material particulado menor a 2.5 µm (PM_{2.5}), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) entre otros (Smith y col. 2000a). La Tabla 2.1 muestra el potencial de calentamiento de los contaminantes generados durante la combustión de biomasa.

Tabla 2.1 Potencial de calentamiento de los diferentes contaminantes emitidos durante la combustión de biomasa. Tomada de (MacCarty y col. 2008a).

Emisión	Potencial de calentamiento global	Fuente
CO ₂	1	IPCC., 2007
CO	1.9	IPCC., 2007
CH ₄	25	IPCC., 2007
TNMHC	12	Edwards y Smith., 2002
N ₂ O	298	IPCC., 2007
Carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés)	680	Roden y col., 2006; Bond y Sun., 2005.

Recientemente, se elaboró un reporte para los tomadores de decisiones con la finalidad de identificar la contribución de algunas de las fuentes de contribución mencionadas anteriormente en los principales países de América Latina (UNEP y CCAC., 2016). Los resultados de dicho estudio muestran que en México se presentó una contribución anual total para el 2010 de 6.5 Mt de CH₄ y 88 kt de EC.

De la contribución total aproximadamente el 3% de las emisiones de CH₄ y el 25% de las de EC provienen de la quema de biomasa para la obtención de energía térmica (cocción y fabricación de ladrillos) y calefacción en hogares rurales. Es importante señalar que la cuantificación total de dichos contaminantes proviene tanto de las IWS como de fogones tradicionales, sin embargo, existe una importante diferencia en la contribución de emisiones de ambos dispositivos la cual se explica a continuación.

2.2 Proceso de combustión de biomasa

La combustión de biomasa es un fenómeno físico-químico el cual se lleva a cabo para la generación de energía térmica y/o eléctrica en dispositivos de pequeña, mediana o gran escala. Sin embargo, la quema de biomasa en dispositivos ineficientes tales como los fogones tradicionales produce una emisión de PICs los cuales tienen un mayor impacto climático que el CO₂ mismo (MacCarty y col. 2008a). La gran diferencia entre las IWS y el TSF o el U-type es la presencia de una cámara de combustión (propia de las estufas eficientes) donde se presentan las siguientes condiciones las cuales optimizan la eficiencia energética y de combustión: 1) temperatura suficientemente alta para alcanzar las 4 etapas de la combustión de biomasa, 2) relación aire/combustible adecuada, 3) tiempo de residencia suficiente para la formación y reacción de los gases de combustión y 4) flujo de aire adecuado para la quemar los gases combustibles.

El proceso físico-químico y las temperaturas asociadas a cada una de las etapas del proceso de la combustión de la biomasa se muestran en el Apéndice A de este trabajo de investigación.

Se han realizado estudios sobre la cuantificación de las emisiones de GHG provenientes tanto de las IWS como de las estufas tradicionales. En este sentido, (Johnson y col., 2009) llevaron a cabo un estudio integral que incluyó la medición directa de las emisiones de GHG de la estufa mejorada Patsari y de un fogón tradicional. Durante dicha investigación se estimó para una muestra de 603 hogares dentro del proyecto, la mitigación promedio por estufa Patsari fue de 3.9 tonCO₂eq/año basados en renovabilidad de la recolección de la leña para la región, lo que resulta en un total de 3,912 tonCO₂eq/año mitigados durante el proyecto.

En el 2008a, MacCarty y colaboradores, realizaron un estudio comparativo para evaluar 4 estufas mejoradas de biomasa en relación al TSF para estimar su contribución en la emisión de GHG aplicando pruebas de rendimiento en laboratorio. Los resultados muestran que el fogón tradicional presentó una contribución de 690 gCO₂e/l mientras que dos de las IWS evaluadas presentaron ~280 gCO₂e/l al término de las pruebas experimentales lo que se traduce en una diferencia de 59%.

Johnson y col. 2008., evaluaron la contribución de emisiones de la estufa tipo plancha Patsari y el U-type mediante pruebas de campo durante un día normal de cocinado en la región rural del estado de Michoacán, México. Los resultados mostraron que el dispositivo tradicional en forma de U presentó factores de emisión de 4.8 ± 2.3 g(c)CH₄/kg y 0.3 ± 0.1 gEC/kg mientras que la estufa eficiente de leña Patsari presentó 0.9 ± 1.0 g(c)CH₄/kg y 0.1 ± 0.2 gEC/kg lo que se traduce en que el U-type presentó una emisión 5 y 3 veces mayor de EC y CH₄, respectivamente.

2.3 Implicaciones del uso de IWS

La introducción y difusión de las IWS en comunidades rurales se ha llevado a cabo con múltiples objetivos dentro de los cuales se encuentra la reducción del consumo de combustible y mejora de la calidad de vida de los usuarios de esta tecnología (Berrueta y col., 2008). Se han realizado diversas investigaciones en las cuales se han evaluado las implicaciones globales, regionales, sociales y locales del uso y adopción de las estufas eficientes de biomasa algunos de los cuales se citan a continuación.

(i) Ahorro de leña

Berrueta y col., 2008, compararon consumo de combustible de la estufa Patsari, TSF y U-type mediante 23 pruebas de consumo de combustible en los hogares rurales. Los resultados muestran que en los hogares rurales donde únicamente se utiliza la estufa de leña Patsari se alcanzó un ahorro de combustible del 67% en relación al TSF. Mientras que en los hogares donde se utilizaba la Patsari en combinación con la estufa de gas LP los ahorros de combustible eran del 74%.

(ii) Impactos en salud

Cuando se lleva a cabo la combustión de leña en fuegos abiertos, en el interior de las viviendas o cocinas, la combustión incompleta de la biomasa conduce a concentraciones de contaminantes del aire en interiores muy superiores a los estándares internacionales de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y ha sido implicado como un agente causal de varias enfermedades en los países en desarrollo como infecciones respiratorias agudas, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer del pulmón, tuberculosis, bajo peso al nacer y cataratas

(Bruce y col., 2000). Adicionalmente, La exposición a niveles elevados de contaminantes del aire en interiores provenientes de la combustión de combustibles sólidos para la cocción de alimentos y calefacción resulta en aproximadamente 4.3 millones de muertes prematuras al año (WHO. 2016) siendo los niños menores de 5 años el sector más afectado con cerca de 1.2 millones de decesos por año (Smith., 2003; Smith y Mehta., 2003). Diversos estudios han mostrado la mejora de la salud de los usuarios de las IWS en comparación con el uso del dispositivo tradicional de fuego abierto. En el 2009 Romieu y colaboradores realizaron un estudio para cuantificar los impactos sobre la salud al introducir la estufa eficiente Patsari en 668 hogares. Se evaluaron mejores condiciones de salud basados en accidentes (quemaduras), así como la enfermedad respiratoria aguda (debido a la presencia de tos) y enfermedad de los ojos (medido como molestias en los ojos). La reducción de quemaduras atribuibles a la introducción de la Patsari fue del 84%, ya que los casos reportados por quemaduras en las mujeres y niños se redujeron de 49 con el dispositivo del fuego abierto de tres piedras a 8 casos utilizando una estufa Patsari. El porcentaje de hogares con miembros sufriendo de enfermedad respiratoria aguda (medida como tos) se redujo de 74% con el dispositivo tradicional a 30% con la adopción de la Patsari. El malestar ocular se redujo de 70% en los hogares utilizando el fogón tradicional a 8% al cambiar a la estufa eficiente de leña.

2.4 Protocolos de evaluación de IWS

A nivel internacional, la evaluación del rendimiento energético de las IWS ha sido el objetivo central de los estudios que han utilizado los protocolos WBT y CCT. La contribución de emisiones de las IWS se determina de forma implícita mediante las mismas pruebas pero vistas como prácticas estándar de cocinado (tales como hervir agua, cocer frijoles, preparar tortillas, etc). Las estufas tradicionales de fuego abierto han sido la línea de comparación de las IWS tanto para el consumo de energía como para los indicadores de emisiones. En el caso del CBC es muy poco el conocimiento que se tiene en relación al desempeño general de las IWS con respecto al dispositivo tradicional. A continuación, se muestran las investigaciones donde se han aplicado estos tres enfoques de evaluación así como los hallazgos principales de cada uno.

2.4.1 Prueba de Ebullición de Agua o Water Boiling Test (WBT)

La prueba WBT es un protocolo de laboratorio para evaluar el desempeño energético y también se ha utilizado para evaluar la contribución de emisiones de las IWS mediante la ebullición del agua en dos fases de alta potencia y una fase de bajo poder en la cual el objetivo es mantener el agua a una temperatura de 3°C por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos. Esta prueba proporciona información confiable a los diseñadores de IWS acerca del rendimiento técnico de los diferentes modelos de estufas de leña (Kumar y col., 2013). La prueba WBT es el protocolo estándar utilizado mundialmente para la evaluación de rendimiento energético y de los parámetros de emisiones de las IWS en relación a las estufas tradicionales.

Jetter y col., 2012, evaluaron la contribución de emisiones de 22 tipos de estufas de biomasa con 6 tipos de combustible siendo el punto de comparación el TSF mediante 3 repeticiones de la prueba WBT para cada estufa. Los resultados muestran que la IWS tipo plancha ONIL presentó una eficiencia modificada de combustión (MCE, por sus siglas en inglés) de 98% en comparación con 96% para el TSF. La MCE es un parámetro de emisiones importante ya que cuanto más cercana a 1 sea más "limpia" fue el proceso de combustión durante la prueba. Los resultados de esta investigación muestran que la eficiencia de combustión del TSF es similar o en ocasiones mayor que la MCE para algunas IWS lo que genera incertidumbre acerca de la efectividad en la reducción de emisiones de estas tecnologías.

Jetter y Kariher., 2009, evaluaron los parámetros de rendimiento y la contribución de emisiones de 14 tipos de IWS en comparación con el TSF utilizando 3 repeticiones para cada estufa mediante pruebas WBT. Los resultados muestran que la estufa eficiente de leña tipo plancha Ecostove presenta un pobre desempeño energético en términos de tiempo de ebullición, eficiencia térmica y consumo específico de combustible comparación con el dispositivo tradicional de fuego abierto. La misma tendencia se observó en la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} donde la IWS presentó una reducción de emisiones nula en comparación con el TSF.

Johnson y col. 2008., evaluaron la contribución de emisiones de la estufa tipo plancha Patsari y el U-type mediante 4 y 7 pruebas WBT, respectivamente bajo condiciones reales de un hogar rural de la región de Michoacán, México. Los resultados muestran que las MCEs fueron similares entre la Patsari y el U-type con $97.4 \pm 2.7\%$ y $95.4 \pm 2.3\%$, respectivamente lo cual también se observó en estudios previos mencionados anteriormente.

Sin embargo, la comparación de ambos dispositivos durante un día normal de cocinado muestra una MCE de $97.6 \pm 2.8\%$ y $89.7 \pm 2.0\%$ para la Patsari y el U-type, respectivamente, siendo las diferencias estadísticamente significativas lo que muestra la diferencia existente en el rendimiento de una misma IWS en relación al fogón tradicional mediante pruebas WBT y en condiciones de campo.

En el estudio realizado por Berrueta y col., 2008, los resultados mostraron la pobre correlación existente entre las pruebas de laboratorio y de evaluación en campo. Mientras que la Patsari presentaba un 30% mayor de consumo de combustible en relación al TSF para completar la prueba WBT, las Pruebas de Rendimiento de la Cocina (KPT, por sus siglas en inglés) las cuales evalúan el consumo de combustible en campo mostraron ahorros de hasta un 67% en comparación con el TSF corroborando lo que se había observado en estudios previos en cuanto a las evaluaciones en condiciones controladas y durante el uso real de las IWS tipo plancha.

2.4.2 Prueba de Cocinado Controlado o Controlled Cooking Test (CCT)

La prueba CCT está diseñada para evaluar el desempeño en general de las IWS respecto a las estufas tradicionales mediante 'simulaciones' de las tareas de cocinado tradicionales de los hogares rurales de la región de estudio. Para ello generalmente se contrata a cocineras de la localidad para que preparen los alimentos de acuerdo a su técnicas/tradiciones de cocinado proporcionándole la cantidad de combustible y los suministros suficientes para completar las tareas de cocción. El rendimiento energético y la contribución de emisiones de las IWS obtenido mediante a pruebas CCT se aproxima en mayor medida desempeño real de las estufas eficientes, en relación a las pruebas WBT, debido a que el cocinado de alimentos típicos es más representativo que hervir grandes volúmenes de agua en las comunidades rurales de México.

MacCarty y col., 2008b, realizaron un estudio en India para evaluar el rendimiento de 3 IWS y 3 estufas tradicionales mediante la preparación de un platillo tradicional de la región de estudio. 9 cocineras locales participaron en la investigación quienes probaron cada una de las 6 estufas evaluadas y como línea base el platillo típico también se preparó en el TSF en 3 repeticiones para dar un total de 57 pruebas. Los resultados muestran que las 3 IWS presentaron ahorros de combustible estadísticamente significativos del 18, 35 y 28% respecto a las estufas tradicionales y del 41, 47 y 39% respecto al TSF durante el cocinado del alimento hindú. Previamente los autores evaluaron las mismas 3 IWS mediante pruebas WBT. En este sentido, la IWS tipo plancha provista con chimenea mostró ahorros de combustible de 39% en su evaluación durante el cocinado real y de un 10% durante las pruebas WBT. En tiempos de cocinado se observó la misma tendencia con ahorros en campo del 22% vs un -4% en laboratorio. Lo anterior muestra que durante las evaluaciones condiciones de uso de real se pueden alcanzar ahorros tanto de combustible como de tiempo de cocinado siendo estas dos variables las más importantes desde el punto de vista del usuario.

Beyene y col., 2015, llevaron a cabo un estudio en Etiopía para cuantificar los impactos de un programa de difusión de IWS. Los hallazgos de esta investigación mostraron que la estimación de los ahorros de combustible en campo es esencial para determinar la reducción de GHG. Además de hacer énfasis en que un buen rendimiento en campo de las IWS es esencial para los usuarios en países en desarrollo con alta dependencia de biomasa tradicional.

Lask y col., 2015, evaluaron tres IWS con carbón residual como combustible y una estufa tradicional como línea de comparación mediante pruebas WBT y durante el cocinado de un platillo tradicional de Haití. En este estudio se determinó el consumo de combustible, factores de emisión de CO y MCE para las 4 estufas evaluadas mediante 7 pruebas WBT y 8 de CCT para cada dispositivo. Los resultados mostraron que mediante las pruebas CCT las 3 IWS evaluadas (EcoRecho, Mirak y Prakti) presentaron reducciones de CO del 27%, 22% y 46%, respectivamente en relación a la estufa tradicional mientras que durante las pruebas WBT se alcanzaron reducciones de -16%, 13% y 18%. De esta forma los autores concluyeron que la prueba WBT puede proporcionar resultados engañosos en comparación con el rendimiento observado en campo de las IWS.

Pennise y col., 2010, evaluaron tres IWS manufacturadas, dos estufas tradicionales de Kenia, África y el TSF como punto de comparación. En total se llevaron a cabo 114 pruebas para las 3 IWS (38 para cada una), 46 pruebas para las dos estufas tradicionales y 54 para el TSF durante la preparación del alimento tradicional de la región (arroz con vegetales) ubicada en un campamento de refugiados al noroeste de Kenia. Los resultados muestran que las IWS evaluadas presentaron ahorros de combustible estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$) en comparación con el TSF (52%, 54%, 46%, 32% y 63%). Sin embargo, no se alcanzaron ahorros de tiempo de cocinado significativos (-8%, -7%, 4%, -12% y -2%) lo cual es una variable de suma importancia para los usuarios de esta tecnología y que en alguna instancia puede conducir a la no adopción de la misma.

Adkins y col., 2010, nuevamente hacen énfasis en la necesidad de realizar evaluaciones en campo para conocer el desempeño real de las IWS. Los autores llevaron a cabo un estudio comparativo para determinar el consumo de combustible aplicando pruebas CCT (n = 60) evaluando una estufa regional (Ugastove), una IWS manufacturada en USA (StoveTec) y un fogón de 3 piedras durante la preparación de un platillo tradicional de Ruhiira, Uganda. Los resultados, primeramente, muestran que se alcanzaron ahorros del 46% en la Ugastove y del 38% en la StoveTec lo que presenta un gran impacto especialmente en esta región donde la disponibilidad de combustible es escasa. Adicionalmente, aplicaron pruebas de consumo de combustible KPT en 13 casas obteniendo un 58% de ahorro de leña en los días normales de cocinado. Los resultados muestran un mayor porcentaje de ahorro de leña mediante pruebas KPT, sin embargo, los autores reportan que dichos resultados pueden ser engañosos debido al pequeño tamaño de muestra y a estimaciones erróneas en campo lo cual puede generar un tema de discusión en futuras evaluaciones mediante este protocolo.

Masera y Navia., 1998, realizaron pruebas CCT durante la preparación de alimentos típicos de la región rural de Michoacán, México en la estufa de plancha Lorena y el TSF. Los hallazgos de este estudio muestran que las tareas de cocinado difieren en: características termodinámicas, potencia de cocinado, tiempo de ebullición, intensidad de trabajo humano asociado y la frecuencia con lo que se realizan. Adicionalmente, muestran que debido a la efectividad de la IWS para la elaboración de tortillas, la cual es la tarea de cocinado principal en las comunidades rurales de México, se presentan mayores incentivos para la adopción de la tecnología.

Bailis y col., 2007, llevaron a cabo pruebas WBT y CCT para evaluar el rendimiento de la estufa Patsari y compararlo con el TSF y el U-type. El número de pruebas para cada estufa en las pruebas de hervir agua fue 3 mientras que se hicieron 6 pruebas CCT (elaboración de tortillas) para cada estufa. Los autores mencionan que el pobre rendimiento de laboratorio no representa un indicativo de que el consumo de combustible de la estufa Patsari en los hogares rurales presente la misma tendencia. Los autores concluyen, como se ha mostrado anteriormente, que existe una necesidad importante de mostrar el rendimiento de las estufas eficientes mediante evaluaciones de consumo de combustible en campo y de llevar a cabo pruebas de cocinado real con diferentes requerimientos de potencia de cocina para mostrar el rendimiento de las IWS en estas tareas de cocinado.

2.4.3 Ciclo de Cocinado Controlado o Controlled Burning Cycle (CBC)

El término "ciclo de quemado" denominado "ciclo de cocinado" o "ciclo de cocción" se introdujo en el estudio reportado por (Johnson y col., 2010) para definir a todas las actividades de cocción de alimentos que se llevan a cabo en una IWS a lo largo de un día normal de un hogar rural. El CBC vincula las evaluaciones del rendimiento en laboratorio con las actividades diarias de cocinado replicando dichos ciclos de quemado (Johnson y col., 2010) y también proporciona una nueva oportunidad para cerrar la brecha existente entre pruebas de laboratorio y de campo (Kshirsagar y Kalamkar., 2014). En este estudio, se considera como ciclo de cocinado la práctica de cocinar varios alimentos en de manera simultánea y secuencial durante un mismo episodio de encendido y operación de la estufa.

Arora y col., 2014, aplicaron un ciclo de cocción típico en dos regiones de la India en tres IWS y en una estufa tradicional de barro para determinar los parámetros de rendimiento (i.e. tiempo de cocinado, consumo específico de energía) así como los factores de emisión de CO y PM_{2.5} por MJ consumido. Estas mismas métricas se obtuvieron en las estufas evaluadas mediante pruebas WBT. Los resultados muestran que las tareas de cocinado con distintas potencias de cocinado presentan diferencias significativas de emisiones de CO y material particulado PM_{2.5}. La conclusión más importante de este estudio fue mostrar que la prueba WBT subestima la reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} de las IWS respecto al TSF debido a que durante el ciclo de cocinado se observó una reducción de emisiones mayor en 2 de las 3 IWS evaluadas.

La descripción completa del procedimiento de los protocolos WBT y CCT se muestra en el Apéndice B de esta investigación. En el caso del CBC, la explicación a detalle del ciclo de cocinado regional utilizado en esta investigación se muestra en la sección 3.3.

2.5 Perspectivas

En general, los estudios mostrados en la sección 2.4.1 muestran que existe incertidumbre en cuanto a la efectividad de las IWS tipo plancha en relación al fogón tradicional en cuanto al ahorro de combustible y a la reducción de emisiones contaminantes cuando se evalúa el rendimiento de esta tecnología mediante pruebas estándar WBT. Sin embargo, es muy poca la evidencia que se tiene hasta el momento para llegar a establecer conclusiones definitivas. Por tal razón, en la primera parte de esta investigación se propone evaluar la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} así como los principales parámetros de rendimiento de las IWS tipo plancha en relación al TSF. Además de que no existe hasta la fecha un estudio similar al que se plantea, otra contribución al estado del arte es explicar las diferencias de rendimiento energético y de contribución de emisiones de las estufas eficientes de plancha en las fases de alta y baja potencia de la prueba WBT.

En la segunda parte de esta investigación, se utilizan pruebas individuales CCT con la finalidad de determinar el rendimiento de la estufa tipo plancha Patsari en relación al U-type durante la preparación de tareas de cocinado tradicionales de la región rural de Michoacán. Los estudios citados previamente donde se aplicó el protocolo CCT mostraron que las IWS presentan un buen desempeño en general en relación a los fogones tradicionales. Sin embargo, en dichas investigaciones se hizo la evaluación de un sólo alimento para determinar los ahorros de combustible y la reducción de emisiones. En este trabajo de tesis se propone evaluar la estufa Patsari en relación al U-type para determinar la variación existente en ambos dispositivos en cuanto a la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5}, consumos de leña y tiempos de cocinado durante el cocinado de 6 alimentos típicos con características de cocinado diferentes.

Finalmente, en la tercera parte de este estudio se propone un CBC para determinar los parámetros de rendimiento y de forma simultánea la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} de la estufa Patsari en relación al U-type y al TSF. La evaluación de dichos parámetros es crucial para evaluar el rendimiento real de las IWS (Arora y col., 2013; Arora y col., 2014). Si bien es cierto que la aplicación de un CBC puede relacionar el desempeño de una IWS en laboratorio y en campo (Johnson y col., 2010), el gran desafío es diseñar una secuencia de cocinado representativa de las actividades diarias en un hogar rural en la cual se alcancen ahorros de combustible en la Patsari comparables con los reportados en estudios de campo previos así como una reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} comparable con la obtenida en condiciones de operación de las estufas eficientes en campo. Adicionalmente, se realiza una comparación en el rendimiento de la Patsari en relación al TSF mediante pruebas WBT y de CBC para comprobar si en realidad las pruebas de ebullición de agua subestiman el desempeño energético y la reducción de emisiones contaminantes de las IWS tipo plancha.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

La Figura 3.1 muestra un resumen de la metodología que se plantea para la aplicación de la prueba WBT así como la medición de emisiones de CO y PM_{2.5} en condiciones controladas de laboratorio.

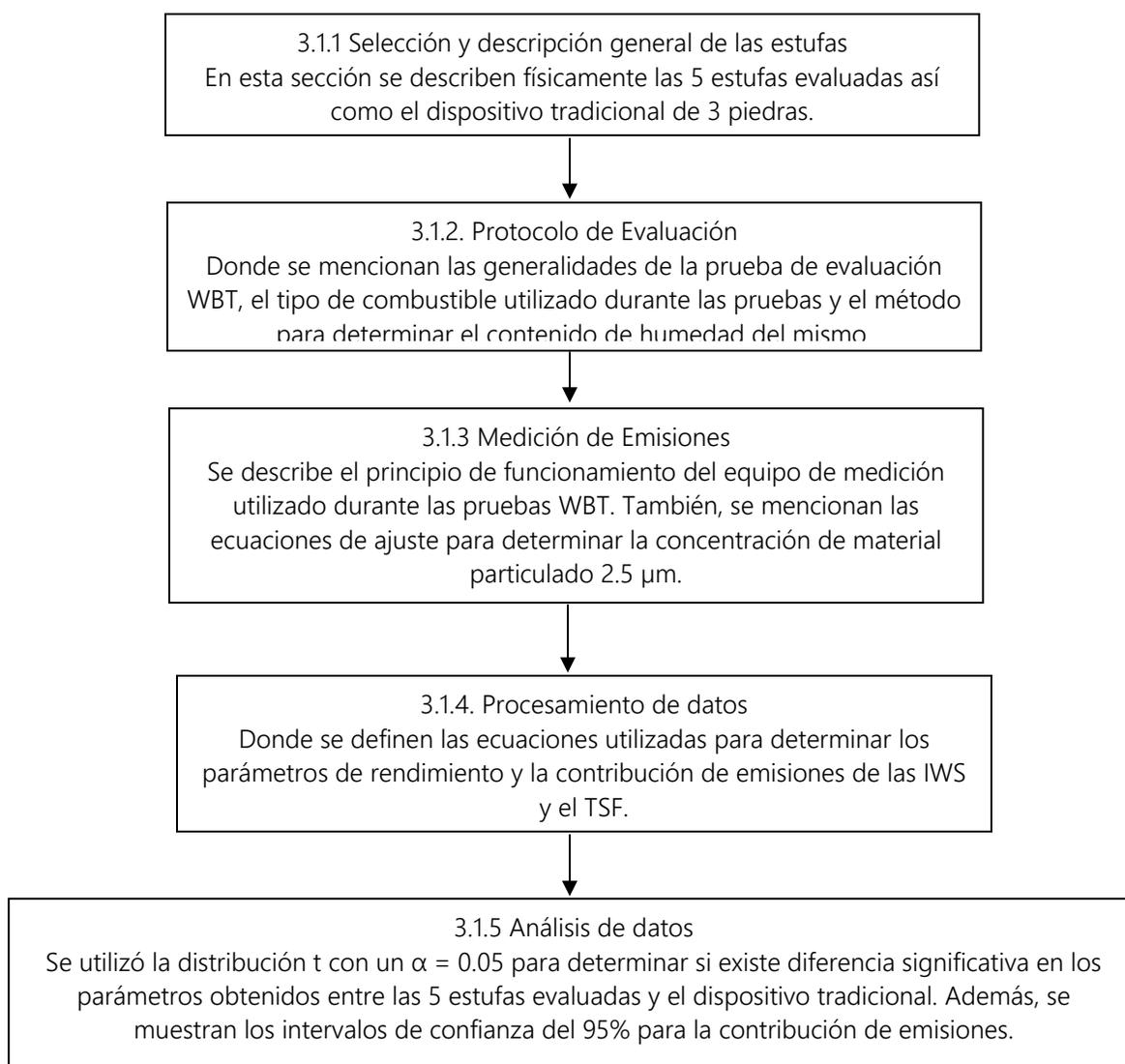


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología del protocolo WBT.

3.1.1 Descripción de estufas

En este trabajo de tesis se evaluaron cinco IWS para aplicando la prueba WBT: Patsari, Patsari Portátil, ONIL, Mera-Mera, Ecostufa y un fogón tradicional de tres piedras como línea de comparación.

- Patsari: La cámara de combustión de la estufa Patsari soporta el comal principal de 52 cm de diámetro. Las dimensiones exteriores de la estufa son: 80 cm de ancho por 100 cm de longitud, con una altura de 27 cm (Berrueta y col., 2008).
- Patsari Portátil: La estufa Patsari Portátil es una estufa con cámara de combustión tipo rocket (ver, MacCarty y col., 2008) fabricada en barro y un comal principal de metal de 54 cm de diámetro. Toda la estructura de la estufa está hecha de metal y los usuarios la utilizan comúnmente para la venta de alimentos en las calles debido a su practicidad.
- ONIL: La estufa ONIL está hecha de material cerámico y el comal principal es una plancha de 34 x 70.5 cm con discos removibles si los usuarios prefieren cocinar a fuego directo. Este tipo de estufa es utilizado también en algunos países de Centro América.
- Mera-Mera: La estufa Mera-Mera es un diseño de Eco-Zoom con dos cámaras de combustión de 14 x 8 cm. El comal principal (plancha) cuenta con dos discos removibles y ambas cámaras están hechas de metal refractario.
- Ecostufa: El cuerpo entero de la Ecostufa es de metal y cuenta con un comal plancha de 40 x 60.5 cm. La cámara de combustión es de 18.5 x 14 cm.
- TSF: Es un dispositivo de tres piedras el cual "encierra" el fuego en una especie de cámara de combustión, no cuenta con una chimenea por lo que la combustión es incompleta e incontrolada (Berrueta y col., 2008).

- ONIL S/N anillos: La estufa ONIL presenta la versatilidad de remover los anillos de su comal principal con la finalidad de mejorar la transferencia de calor, sin embargo, sin los anillos no se puede considerar una estufa de plancha.

Las IWS y el TSF evaluados mediante la Prueba de Ebullición de Agua se muestran en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Estufas evaluadas: Ecocostufa, Mera-Mera, Patsari Portátil, TSF, ONIL y Patsari (de izquierda a derecha).

Por otra parte, se evaluó la estufa ONIL con y sin anillos con la finalidad de comparar la contribución de emisiones y los parámetros de rendimiento de la misma. En la Figura 3.3 se muestra la estufa ONIL con los anillos sobre la plancha y removiendo los mismos para el uso del fuego directo.

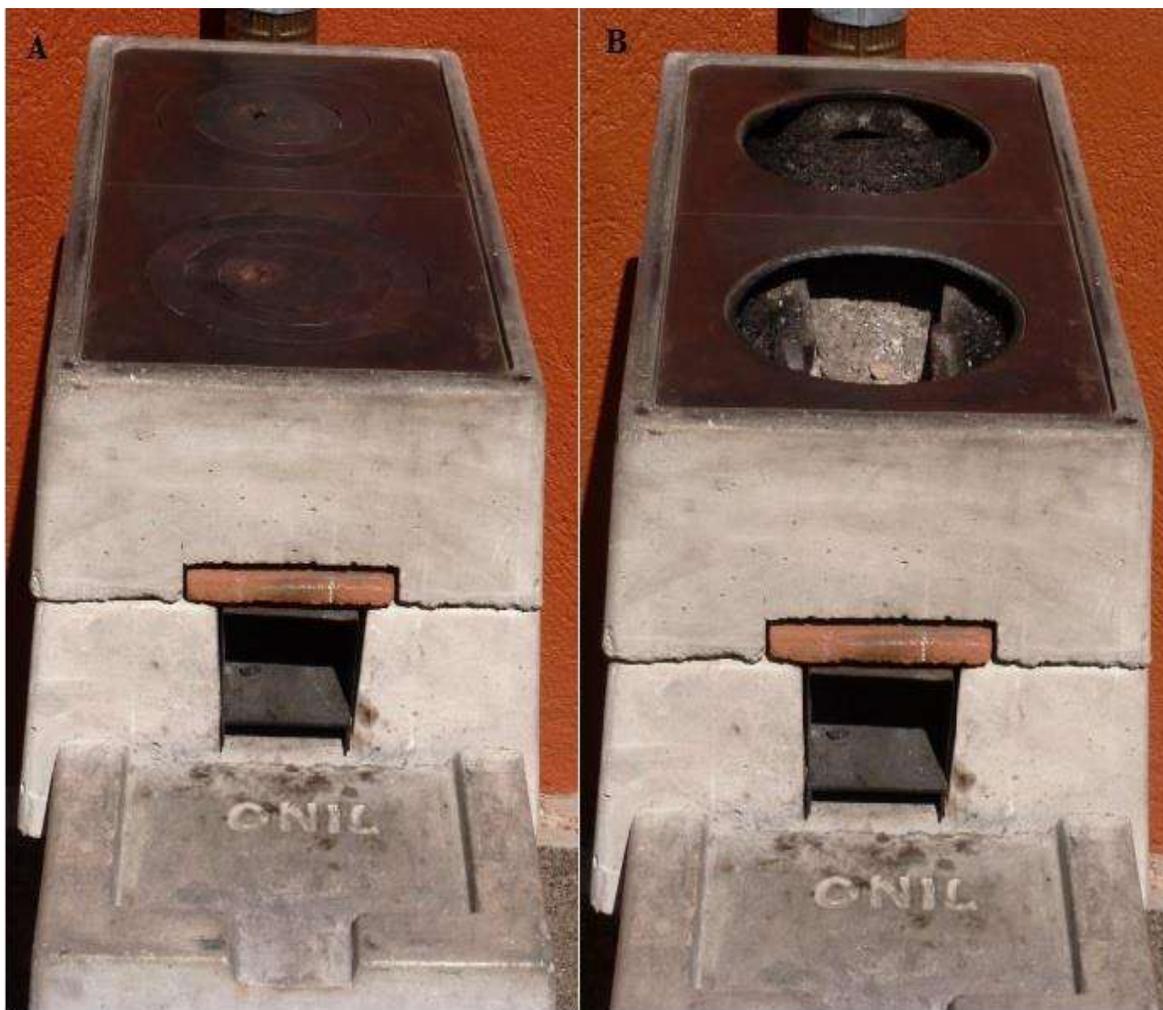


Figura 3.3 Estufa ONIL: A. Superficie del comal principal, B. Área de la plancha sin anillos.

3.1.2 Protocolo de evaluación

El protocolo WBT versión 4.1.2 (WBT., 2013) se utilizó para determinar la caracterización de las emisiones de 5 IWS tipo plancha en relación al TSF. La prueba WBT consta de tres fases:

1. Alta potencia: inicio en frío.
2. Alta potencia: inicio caliente.
3. Baja potencia: fuego lento.

En las fases de alta potencia inicio frío y caliente se utilizan 5 litros de agua los cuales se colocan en la olla principal y el objetivo de ambas fases es alcanzar el punto de ebullición registrando el tiempo al cual inicia el cambio de fase. La diferencia de la fase de alta potencia de la prueba WBT es que en la primera fase la estufa se evalúa cuando la estufa se encuentra "fría" (sin previo uso) y en la segunda fase la estufa viene precedida del uso del inicio en frío. En la tercera fase la olla principal la cual contiene los 5 L de agua se cocinan a fuego lento durante 45 minutos 3°C debajo del punto de ebullición. Antes del inicio de la prueba se tienen que registrar los siguientes parámetros: temperatura ambiente, contenido de humedad, peso de la olla(s) vacías, temperatura local de ebullición y el tipo de combustible que se va a utilizar. Al inicio de cada fase se tiene que registrar: tiempos de inicio, cantidad de combustible, temperatura de la olla(s) y peso de la olla(s) agregando el agua. Al final de cada una de las fases se cuantifica: cantidad de leña restante, temperatura del agua, peso de la olla(s) con el agua y la cantidad de carbón residual.

Para todas las pruebas WBT se utilizó ocote como iniciador de llama (30 g) y encino blanco (*Quercus Bicolor*) como combustible el cual es comúnmente utilizado en algunas comunidades rurales de México para la cocción de alimentos tradicionales. Las dimensiones de la leña usada durante todas las pruebas WBT fueron 2 cm x 4 cm x 40 cm y se utilizó una balanza digital con 1 g de precisión para cuantificar las mediciones de combustible. El contenido de humedad en el combustible se determinó utilizando un dispositivo que determina la humedad en base seca de la leña (Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter®). Durante las pruebas WBT tanto para las estufas eficientes como para el TSF se tomaron 9 mediciones de la humedad en base seca para cada estufa según lo reportado por (Johnson y col., 2008). Sin embargo, para la obtención de los parámetros de desempeño es necesario obtener la humedad en base húmeda la cual se obtuvo mediante la ecuación 3.1 la cual se reporta en el protocolo WBT versión 4.1.2. El promedio del contenido de humedad en el combustible fue de $8.8 \pm 1.4\%$ (Rango de 7-13%).

$$\% \text{Húmedad en base húmeda} = \frac{\% \text{húmedad base seca}}{1 + \% \text{húmedad base seca}} \quad (3.1)$$

3.1.2.1 Parámetros de rendimiento IWA Tier

Los indicadores Tier del International Workshop Agreements (IWA) proporcionan niveles en los niveles de eficiencia, emisiones y rendimiento de la seguridad como metas cuantitativas y aspiraciones para desarrolladores de tecnología y para ayudar a los interesados a tomar de decisiones informadas relacionados con la estufa y el uso de combustible (ISO IWA., 2012). El valor de rendimiento Tier 0 se define como equivalente al peor desempeño tal como el de los fuegos abiertos tradicionales. Los Tier 1 a 3 representan los rangos de desempeño intermedio, y el Tier 4 define el mejor rendimiento al que una estufa puede aspirar.

El Tier 4 para emisiones de interiores está vinculado explícitamente con el rendimiento de emisiones necesario para cumplir los objetivos de calidad del aire de la OMS para monóxido de carbono y material particulado PM_{2.5}. La Tabla 3.1 muestra el rango de valores de los parámetros Tier de acuerdo a energía, emisiones totales y emisiones al interior mediante los cuales se puede evaluar el rendimiento en general de las IWS (ISO IWA., 2012).

Tabla 3.1 Rango de valores de los parámetros IWA Tier en energía, emisiones totales y emisiones al interior. (Fuente ISO IWA., 2012).

Categoría	Indicadores IWA Tier	Unidades	Tier 0	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
Energía	Eficiencia térmica alta potencia	%	<15	≥15	≥25	≥35	≥45
	Consumo específico bajo poder	MJ/min/L	>0.05	≤0.05	≤0.039	≤0.028	≤0.017
Emisiones totales	Emisiones CO alta potencia	g/MJd	>16	≤16	≤11	≤9	≤8
	Emisiones CO bajo poder	g/min/L	>0.20	≤0.20	≤0.13	≤0.10	≤0.09
	Emisiones PM _{2.5} alta potencia	mg/MJd	>979	≤979	≤386	≤168	≤41
	Emisiones PM _{2.5} bajo poder	mg/min/L	>8	≤8	≤4	≤2	≤1
Emisiones al interior	Emisiones al interior de CO	g/min	>0.97	≤0.97	≤0.62	≤0.49	≤0.42
	Emisiones al interior de PM _{2.5}	mg/min	>40	≤40	≤17	≤8	≤2

3.1.3 Medición de emisiones

El Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés), desarrollado por el Centro de Investigaciones Aprovecho, Oregon, USA, se utilizó para determinar la contribución de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$). El PEMS utiliza una celda electroquímica para estimar la concentración de CO, un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) para determinar las concentraciones de CO_2 y un sensor de dispersión de luz para determinar las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ (PEMS., 2012). El PEMS cuenta con una campana de tela resistente a altas temperaturas para la captura de emisiones provenientes de los dispositivos de combustión de biomasa. El "método de la campana" para capturar, diluir y medir las emisiones de contaminantes provenientes de las estufas de biomasa ha sido utilizado en estudios previos (MacCarty y col., 2008a; Yuntewi y col., 2008; Jetter y Kariher., 2009; MacCarty y col., 2010). Los sensores de CO y CO_2 se calibraron utilizando una mezcla de 3000 ppm de CO_2 y 100 ppm de CO y nitrógeno (N_2) como gas de ajuste como se reportó en (MacCarty y col., 2008a). Las mediciones ópticas de $\text{PM}_{2.5}$ de dispersión de luz del PEMS se referenciaron a mediciones gravimétricas previas (método de filtros) utilizando los siguientes factores de ajuste para cada estufa⁴:

$$\text{Patsari: } (y[\text{PM}_{2.5, \text{ filtro}}] = 5.1[\text{PM}_{2.5, \text{ óptico}}] + 5417), R^2 = 0.84, \text{ (3.2)}$$

$$\text{Ecostufa: } (y[\text{PM}_{2.5, \text{ filtro}}] = 19[\text{PM}_{2.5, \text{ óptico}}] + 2690), R^2 = 0.90, \text{ (3.3)}$$

$$\text{ONIL: } (y[\text{PM}_{2.5, \text{ filtro}}] = 11[\text{PM}_{2.5, \text{ óptico}}] + 2667), R^2 = 0.99, \text{ (3.4)}$$

⁴ Las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 se obtuvieron mediante un ajuste lineal entre mediciones ópticas vs gravimétricas para las estufas Patsari, Ecostufa y ONIL, respectivamente.

Donde: $[PM_{2.5, \text{ filtro}}]$ and $[PM_{2.5, \text{ óptico}}]$ son las concentraciones $PM_{2.5}$ de filtros y ópticas, respectivamente. Se utilizó la Ecuación (3.2) para ajustar las concentraciones $PM_{2.5}$ de dispersión de luz de las estufas Patsari Portátil y Mera-Mera debido a que las mediciones de filtros no estaban disponibles para estas estufas. La Figura 3.4 muestra la configuración de medición de emisiones para las pruebas WBT de este trabajo de investigación.

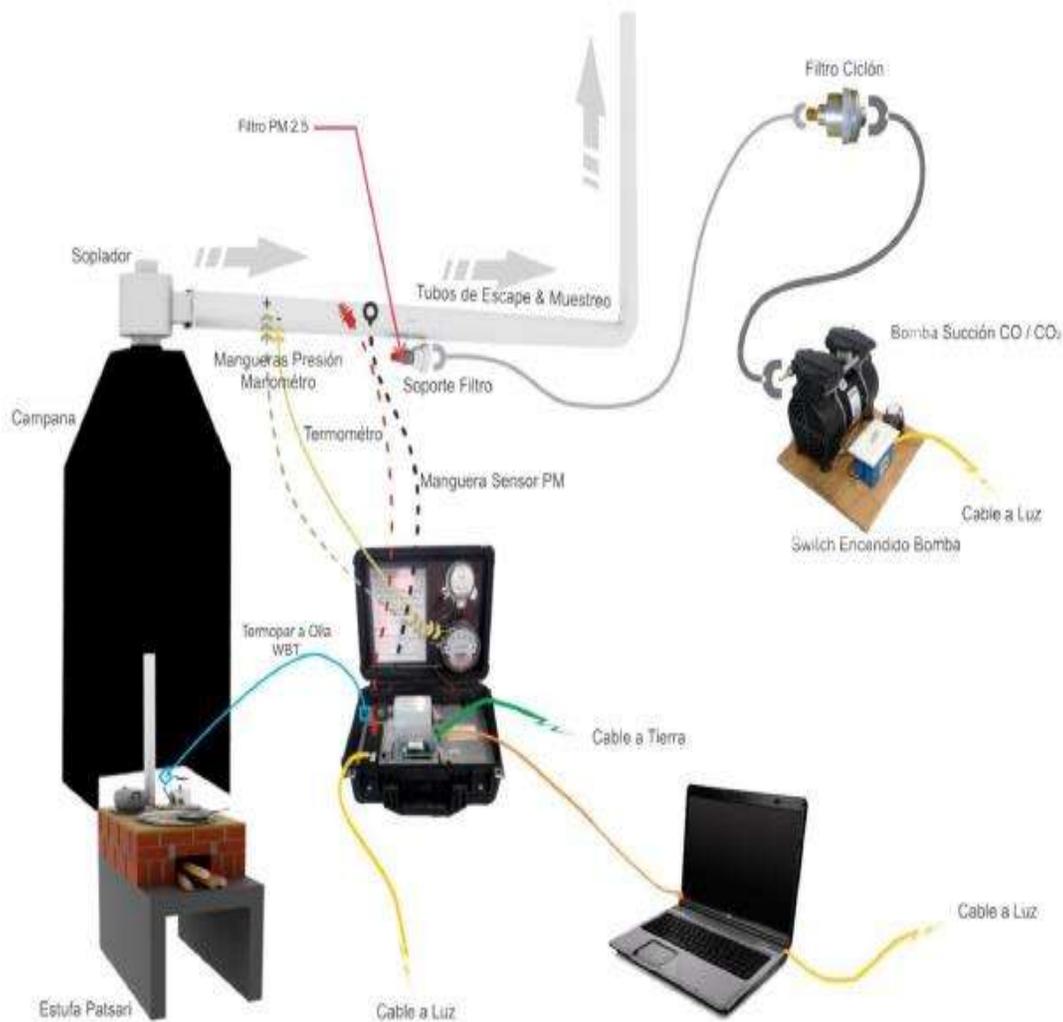


Figura 3.4 Configuración de medición de emisiones utilizando el PEMS durante las pruebas WBT. (Tomado del Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa, LINEB)

3.1.4 Procesamiento de datos

Balances de carbono

Para realizar el análisis de emisiones provenientes tanto de las IWS como del dispositivo tradicional es fundamental realizar el balance de carbono el cual determina las entradas y salidas de carbono presentes en la leña durante el proceso de combustión de la mists. Para determinar los balances de carbono se utilizaron las siguientes ecuaciones reportadas por (Zhang y col., 2000):

Carbono de entrada

$$\begin{aligned}
 &= (\text{madera húmeda consumida}) \\
 &* (1 - \text{humedad de la leña en base húmeda}) \\
 &* (\text{contenido de carbono en la madera}) \\
 &- (\text{cantidad de carbón producido durante la prueba}) \\
 &* \text{contenido de carbón en el carbón residual) (3.5)
 \end{aligned}$$

Carbono en la salida

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM_{2.5}}} * \text{carbono de entrada (g (c))} \right) \\
 &+ \left(\frac{C_{CO}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM_{2.5}}} * \text{carbono de entrada (g (c))} \right) \\
 &+ \left(\frac{C_{PM_{2.5}}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM_{2.5}}} * \text{carbono de entrada (g (c))} \right) (3.6)
 \end{aligned}$$

Donde C_{CO_2} , C_{CO} , $C_{PM_{2.5}}$ es el promedio de las concentraciones medidas en tiempo real durante cada una de las fases de la prueba WBT.

Emisiones totales de CO y PM_{2.5}: la emisión total de un contaminante representa la cantidad emitida durante un determinado periodo de tiempo de uso de la estufa eficiente o del TSF. En este caso para estimar la emisión de CO y PM_{2.5}, expresada en gramos totales durante cada fase de la prueba WBT, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Emisión total de CO

$$= \left(\frac{C_{CO}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM_{2.5}}} * \text{carbono de entrada (g (c))} \right) * \frac{1 \text{ mol de CO}}{12 \text{ g de C}} * \frac{28 \text{ g de CO}}{1 \text{ mol de CO}} \quad (3.7)$$

Emisión total de PM_{2.5}

$$= \left(\frac{C_{PM_{2.5}}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM_{2.5}}} * \text{carbono de entrada (g (c))} \right) \quad (3.8)$$

Eficiencia Modificada de Combustión: la MCE es un parámetro para determinar la calidad de la combustión tanto de las estufas mejoradas como del fogón tradicional. La MCE también se encuentra reportada en otros estudios (Jetter y col., 2012) y se define como la fracción de carbono combustible emitida como CO₂ (Johnson y col., 2010). La MCE se determinó siguiendo la ecuación:

$$MCE = \frac{\text{moles de CO}_2}{\text{moles de (CO}_2 + \text{CO)}} \quad (3.9)$$

Relación de emisiones de CO: expresa la relación de productos de la combustión incompleta por kg de CO₂ producido durante la combustión de la leña. Dicho parámetro se calcula mediante el número de moles del contaminante y el número de moles de CO₂ emitidos y convertido a porcentaje multiplicando esta relación por 100 (MacCarty y col. 2008a). Otra forma de expresarlo es mediante los gramos de carbono del contaminante dividido entre los kilogramos de carbono de CO₂ como lo reportaron (Johnson y col. 2008). En este caso para calcular la emisión de CO expresada en g(c) por kg(c) de CO₂ se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Relación de emisiones de CO} = \frac{g(c)CO}{kg(c)CO_2} \quad (3.10)$$

Factores de emisión: los factores de emisión (EF, por sus siglas en inglés) para un contaminante se definen como la masa del contaminante emitido por la masa de combustible consumido en la IWS (Zhang y col., 1999). En este caso se utilizó la siguiente ecuación general para el cálculo de los EF de CO y PM_{2.5}:

$$\text{Factores de emisión} = \frac{g(c)\text{contaminante}}{kg \text{ combustible seco}} \quad (3.11)$$

Potencia de cocción (P): es la relación de la energía consumida de la leña por estufa por unidad de tiempo, matemáticamente se expresa:

$$P = \frac{f_d \times LHV}{60(t_f - t_i)} \quad (3.12)$$

Donde f_d es el consumo equivalente de leña durante cada fase de la prueba, LHV es el poder calorífico inferior y $(t_f - t_i)$ es la duración de cada fase en la prueba WBT.

Consumo específico de combustible (SFC): es la relación de combustible consumido para la cantidad de agua en cada una de las fases de la prueba WBT, matemáticamente se define por la ecuación:

$$SFC = \frac{f_d}{W_{wf}} \quad (3.13)$$

Donde W_{wf} es la masa de agua hervida.

Tiempo de ebullición: es el tiempo cuando la olla principal (conteniendo los 5 L de agua) alcanza el punto de ebullición local durante las fases de alta potencia. En la fase de fuego lento el agua se cocina a fuego lento durante 45 minutos.

Eficiencia térmica: la eficiencia térmica (TE, por sus siglas en inglés) es una relación del trabajo realizado por el calentamiento y la evaporación del agua por la energía del combustible.

$$TE = \frac{4.186W_w(T_f - T_i) + 2260W_v}{f_d * LHV} \quad (3.14)$$

Donde W_w es la masa de agua en la olla, el calor específico del agua (4.186 J/g°C) y el cambio en la temperatura del agua ($T_f - T_i$), el producto de la cantidad de agua evaporada de la olla W_v y el calor latente de la evaporación del agua (2260 J/g). El valor calorífico inferior LHV (también llamado valor neto de calentamiento).

Las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 para el cálculo de la potencia, consumo específico y eficiencia térmica, respectivamente también fueron utilizadas en el estudio realizado por (Berrueta y col., 2008) así como en el protocolo WBT (WBT., 2013).

3.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)

La Figura 3.5 muestra un resumen la metodología que se plantea para la aplicación de la prueba CCT para evaluar la estufa Patsari y un fogón tradicional en forma de U.

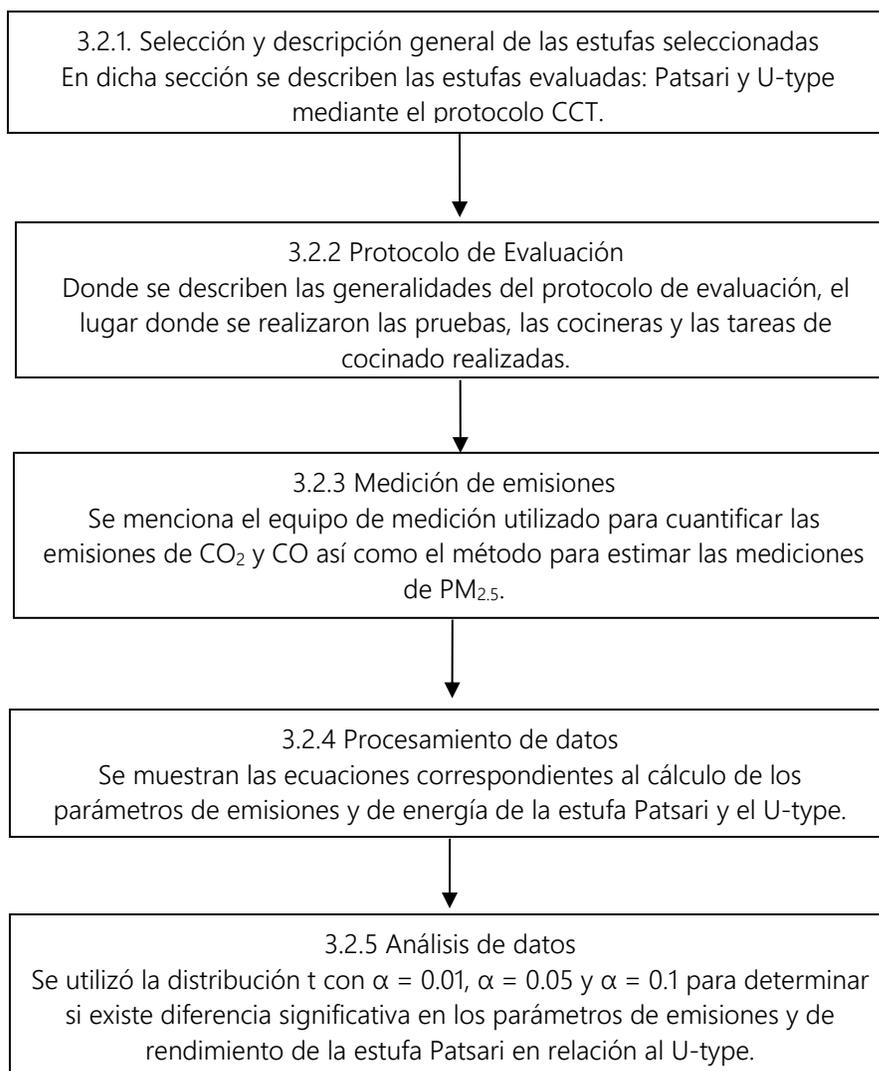


Figura 3.5 Esquema metodológico del protocolo CCT.

3.2.1 Descripción de estufas

Para la Prueba de Cocinado Controlado se evaluaron la estufa Patsari y el dispositivo tradicional en forma de U. La Figura 3.5 muestra las estufas evaluadas: Patsari y U-type durante las pruebas individuales CCT.

- Patsari: en la sección 3.1.1 se puede encontrar la descripción de la estufa Patsari.
- U-type: el fogón en forma de “U” es otro diseño de las estufas tradicionales el cual se construye en diversas regiones de México con barro o arcilla (Berrueta y col., 2008). Este dispositivo no cuenta con una chimenea de manera que el fuego se encierra en un tipo de cámara de combustión.



Figura 3.6 Estufas evaluadas durante las pruebas CCT: (A) estufa Patsari y (B) U-type.

3.2.2 Protocolo de evaluación

La prueba CCT se utiliza para determinar diversos parámetros de rendimiento mediante la preparación de alimentos típicos de una región en específico y de manera implícita se determina la contribución de emisiones contaminantes. La importancia de esta prueba radica en que mediante los indicadores CCT se puede obtener el desempeño real en un entorno de uso controlado de las estufas mejoradas y del dispositivo tradicional. El protocolo CCT permite:

1. Comparar la cantidad de combustible utilizado por diferentes modelos de estufas para la cocción de un alimento tradicional.
2. Comparar el tiempo necesario para cocinar una tarea de cocina típica.
3. Evaluar la tasa de emisiones durante toda la prueba CCT.

En este trabajo de tesis se utilizó el protocolo CCT versión 2.0 (CCT., 2013) para la determinación de los parámetros de rendimiento y la contribución de emisiones de la estufa Patsari y el U-type durante el cocinado de 6 alimentos tradicionales de la región rural de Michoacán, México. Las tareas individuales de cocinado fueron determinadas con base a más de 10 años de experiencia en campo de técnicos campo de Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable, A.C. (GIRA), fueron validadas con cocineras de algunas comunidades rurales de la región del Lago de Pátzcuaro e incluyeron el cocinado de: 3 kg de tortillas, freír 5 piezas de huevo, hervir 1 kg de frijoles, sopa de arroz, freír ½ kg de frijoles y hervir 1 L de agua en la Patsari y el fogón en forma de U. Todas las pruebas CCT se realizaron en una cocina simulada en el Centro de Innovación y Desarrollo de Ecotecnologías de GIRA, A.C. ubicado en la comunidad de Tzentzenguaro, Pátzcuaro, Michoacán, México siendo las dimensiones de esta cocina similares a las de un hogar rural de la región (4m x 3.4m x 3m).

Para la realización de las pruebas individuales CCT se contrató a dos cocineras de la misma región quienes cocinaron los alimentos con las mismas técnicas que se utilizan cotidianamente en su hogar. El tipo de combustible que se utilizó fue encino blanco (*Quercus Bicolor*) siendo las dimensiones de la madera utilizada: 3 cm x 5 cm x 30 cm y se utilizó una balanza digital con 1 g de precisión para cuantificar las mediciones de combustible. Para todas las pruebas CCT se utilizaron ~40g de ocote (resina de pino) como iniciador del fuego en las estufas. El contenido de humedad en el combustible se determinó utilizando un medidor de humedad de leña (Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter®) lo cual también fue reportado por (Pennise y col., 2010). Para la obtención de la humedad en base húmeda se aplicó la ecuación 3.1 mostrada en la sección anterior. El promedio del contenido de humedad en el combustible fue de $10 \pm 2\%$ (Rango de 7-15%).

El procedimiento de cocinado de cada una de las tareas individuales se describe en el Apéndice C de este trabajo de investigación.

3.2.3 Medición de emisiones

Las emisiones provenientes tanto de la estufa Patsari y el U-type se recolectaron utilizando la misma campana descrita en la sección 3.1.3 provista de un ventilador para extraer las emisiones de ambos dispositivos. Las emisiones de CO₂ y CO se determinaron mediante un Analizador de Gases Portátil (FGA, por sus siglas en inglés). El FGA proporciona mediciones en tiempo real de HC, CO, CO₂, NO_x, O₂ y la relación aire combustible aplicando el método NDIR para determinar las concentraciones de HC, CO y CO₂ utilizando luz infrarroja de frecuencia fija para caracterizar las concentraciones de cada gas (Applus Autologic Inc., 2007). La toma de muestra de la Patsari se introdujo directamente en la chimenea de la estufa (Zhang y col., 1999; 2000; Tsai y col., 2003) utilizando una sonda a 40, 50 y 60 cm de la base de la misma. En el caso del U-type las mediciones se realizaron a ~1.5 m por encima del fuego (Roden y col., 2009) utilizando una sonda provista con tres puntas para la toma de muestras (Johnson y col., 2009; Roden y col., 2006). Los sensores de CO y CO₂ del FGA se calibraron utilizando una mezcla de CO y CO₂ de acuerdo a lo reportado por (Johnson y col., 2009). Para determinar las concentraciones de PM_{2.5} se utilizó el método gravimétrico como previamente fue reportado por (Jetter y Kariher., 2009). Se utilizó una bomba de vacío GAST (Gast Manufacturing Inc.) con un flujo de 16.7 L/min. El material particulado PM_{2.5} se recolectó en filtros de fibra de vidrio (4 pulgadas de diámetro, 1 µm de tamaño de poro, HI-Q Environmental Products; San Diego, CA) los cuales se colocaron en un casete para filtro (ILPH-102, HI-Q Environmental Products; San Diego, CA) utilizando un ciclón para PM_{2.5} (URG-2000-30EHS, URG; Chapel Hill, NC). Los filtros se estabilizaron en un cuarto a 23°C y 40% de humedad por al menos 24 horas (Li y col., 2011) y posteriormente fueron pesados antes y después del muestreo utilizando una micro-balanza con 0.01 mg de precisión (CX 265; Citizen Scale India Private Limited).

3.2.4 Procesamiento de datos

3.2.4.1 Parámetros de emisiones

El cálculo de los balances de carbono, emisiones totales de CO y PM_{2.5}, MCE y EF de CO y PM_{2.5} se realizaron mediante las ecuaciones (3.5 y 3.6), (3.7 y 3.8), 3.9 y 3.11, respectivamente descritas previamente.

3.2.4.2 Parámetros de desempeño

Consumo de combustible: el consumo de leña seca (DWC, por sus siglas en inglés) considera el combustible consumido multiplicada por su porcentaje de humedad en base húmeda:

$$DWC = (f_f - f_i) * (1 - m) \quad (3.15)$$

SFC: representa el combustible necesario para cocinar una cantidad de alimento específico:

$$SFC = \frac{f_d}{W_f} \quad (3.16)$$

Donde f_d and W_f están expresados en gramos. Nota: para obtener el SC por kilogramo de comida multiplicar por 1000.

Tiempo total de cocción: se define como el tiempo de cocción efectivo durante una tarea individual o el ciclo de cocinado:

$$\Delta t = t_f - t_i \quad (3.17)$$

Donde t_f and t_i son los tiempos final e inicial respectivamente.

Las Ecuaciones 3.15 a 3.18 utilizadas en esta sección se encuentran reportadas en el protocolo internacional CCT (CCT., 2013).

3.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)

La secuencia de cocinado utilizada en el CBC se diseñó de acuerdo a observaciones en campo en hogares rurales de la región rural de Michoacán, México de la forma en la cual los usuarios de la estufa Patsari cocinan sus alimentos y como utilizan el comal principal y las hornillas secundarias de la estufa haciendo un uso eficiente tanto de las superficies de cocción como del calor generado. El CBC incluye tareas que se preparan de forma secuencial y simultánea y es importante mencionar que el ciclo de cocinado fue validado por las cocineras de la región que contribuyeron en la realización de las pruebas. En este sentido, el CBC se utilizó para determinar en la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} así como los parámetros de rendimiento de la estufa Pastari, U-type y TSF. Las pruebas del CBC en los tres dispositivos las realizó una de las cocineras mencionadas anteriormente y se utilizó la misma cocina simulada descrita en la sección 3.2.2.

El CBC incluyó los siguientes alimentos: 3 kg de tortillas, freír 5 piezas de huevo, ½ kg de arroz para preparar sopa de arroz, ½ kg de frijoles fritos y hervir 1 L de agua. El procedimiento de cocinado fue el siguiente: primeramente se elaboraron los 3kg de tortillas y posteriormente se cocinaron de forma simultánea la sopa de arroz, los frijoles y el agua a hervir en el comal principal de la Patsari. Las 5 piezas de huevo se cocinaron en uno de los comales secundarios. La misma secuencia de cocinado se llevó a cabo en ambos fogones utilizando un comal de 52 cm de diámetro el cual se utiliza por los usuarios de este dispositivo para elaborar tortillas así como la cocción de otros alimentos.

La Figura 3.7 muestra las estufas evaluadas durante el CBC donde también se puede observar el comal para cada uno de los fogones. La descripción de las tres estufas evaluadas se puede encontrar en las secciones 3.1.1 y 3.2.1. En el Apéndice C, Figura C1, se muestra la secuencia de cocinado del CBC en la estufa Patsari y en ambos fogones. En la Figura C2 se muestran algunas de las secuencias de cocción observadas en diferentes hogares rurales de la región.



Figura 3.7. Estufas evaluadas durante el CBC. De izquierda a derecha: Patsari, U-type y TSF.

La medición de emisiones de CO_2 y CO se realizó con el FGA, mientras que la estimación de $\text{PM}_{2.5}$ se realizó mediante el método gravimétrico. La descripción de las técnicas y equipos de medición se describe en la Sección 3.2.3. Los parámetros de emisiones y rendimiento estimados fueron: emisiones totales de CO y $\text{PM}_{2.5}$, consumo de combustible, SFC y tiempo de cocinado. Las ecuaciones utilizadas para determinar dichas métricas se describen en las Secciones 3.2.4.1 y 3.2.4.2.

3.4 Análisis estadístico de datos

Dado que el número de repeticiones es pequeño, se utilizó la prueba t en lugar de otros análisis estadísticos tales como la prueba Welch (Winter y col., 2013). Para la primera sección de resultados de este trabajo de tesis (i.e. WBT) se realizó el análisis estadístico de la diferencia de medias de las IWS evaluadas en comparación con el TSF utilizando la prueba t de dos vías considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ como se ha reportado en estudios previos (Berrueta y col., 2008; Jetter y Kariher., 2009; Arora y Jain., 2015). En forma similar, los resultados de las tareas individuales mediante el protocolo CCT así como para el ciclo de cocinado CBC se utilizó la distribución t con los niveles de significancia $\alpha = 0.01$, $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.10$ como previamente se reportó en (Beyene y col., 2015).

En el Apéndice D se muestran el análisis estadístico para cada una de las secciones de resultados de este trabajo de investigación.

Capítulo 4

Resultados

En este Capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de los protocolos WBT y CCT en las secciones 4.1 y 4.2, respectivamente. En la Sección 4.3 se muestran los resultados del CBC en la estufa Patsari a través de diferentes niveles de comparación. Finalmente, en la sección 4.4 se presenta la discusión de los resultados encontrados en el rendimiento de las IWS respecto al dispositivo tradicional durante las pruebas de evaluación citadas anteriormente.

4.1 Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

4.1.1 Contribución de emisiones de las IWS y TSF

La Tabla 4.1 muestra las MCE, relación de emisiones de CO y emisiones totales de CO y PM_{2.5} para las estufas tipo plancha y el TSF para las fases de alto y bajo poder durante las 5 pruebas⁵ WBT. En general, todas las estufas de plancha mostraron una reducción de emisiones estadísticamente significativa en comparación con el TSF. Las mayores reducciones en las emisiones totales de CO y PM_{2.5} en la fase de alto poder fueron del 67% y 52% para las estufas ONIL y Patsari, respectivamente, siendo las diferencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

⁵ Cada prueba WBT consta de 3 fases (2 de alta y 1 de baja potencia). Por lo tanto, tenemos 15 datos para cada IWS y el TSF (10 datos fase de alta potencia y 5 datos en fase de bajo poder).

Las reducciones promedio para las estufas tipo plancha durante la fase de bajo poder relativas al TSF fueron sustanciales y estadísticamente significativas con un 67% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.05$) para el CO y 63% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.05$) para el $PM_{2.5}$, con la Ecostufa y la ONIL mostrando las mayores reducciones, respectivamente. Adicionalmente, las reducciones promedio de las 5 estufas respecto al TSF en la relación de emisiones de CO para las fases de alta y baja potencia fueron 66% y 71%, respectivamente, siendo las diferencias entre las estufas y el TSF estadísticamente significativas con $\alpha = 0.05$. Los porcentajes de reducción para cada una de las IWS evaluadas en relación al TSF se muestran en el Apéndice D, Tabla D1.

Tabla 4.1. Contribución de emisiones de las IWS y TSF durante las fases de alta y baja potencia.

Fase	Estufa	N	gCO ^a	valor p	gPM _{2.5} ^a	valor p	g(c)CO/kg(c)CO ₂	valor p	MCE (%)	valor p
Fases de alta potencia	TSF	10	59 ± 31	-	5.3 ± 2.9	-	81 ± 43	-	93 ± 4	-
	Patsari	10	43 ± 12	0.19	2.5 ± 0.9	0.02	31 ± 13	< 0.01	97 ± 1	< 0.01
	Patsari Portátil	10	41 ± 9	0.11	3.0 ± 0.8	0.04	35 ± 13	0.01	97 ± 1	0.01
	Mera-Mera	10	44 ± 11	0.70	3.5 ± 1.2	0.03	40 ± 13	0.01	96 ± 1	0.01
	Ecostufa	10	22 ± 8	< 0.01	2.9 ± 1.0	0.03	19 ± 6	< 0.01	98 ± 1	< 0.01
	ONIL	10	20 ± 9	< 0.01	3.0 ± 1.1	0.04	13 ± 7	< 0.01	99 ± 1	< 0.01
Fase de baja potencia	TSF	5	33 ± 12	-	4.4 ± 1.1	-	52 ± 28	-	95 ± 3	-
	Patsari	5	17 ± 8	0.04	1.8 ± 0.3	0.01	15 ± 5	0.04	98 ± 1	0.03
	Patsari Portátil	5	18 ± 7	0.05	1.9 ± 0.6	< 0.01	15 ± 5	0.04	99 ± 1	0.03
	Mera-Mera	5	17 ± 8	0.05	2.2 ± 0.4	0.01	18 ± 7	0.05	98 ± 1	0.04
	Ecostufa	5	11 ± 3	0.01	2.2 ± 0.6	0.01	11 ± 2	0.03	99 ± 1	0.02
	ONIL	5	14 ± 8	0.02	1.6 ± 0.5	< 0.01	17 ± 10	0.05	98 ± 1	0.04

Notas: Las cinco IWS fueron comparadas contra el TSF utilizando la distribución t con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

^a Emisiones totales por cada fase completada.

Las fases de alta potencia incluyen el inicio frío y caliente de la prueba WBT.

Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

La Figura 4.1 muestra el promedio de las eficiencias modificadas de combustión (MCE) y los factores de emisión de $PM_{2.5}$ para IWS y el TSF. Las MCEs para ONIL ($99 \pm 1\%$), Ecostufa ($98 \pm 1\%$), Mera-Mera ($97 \pm 1\%$), Patsari ($98 \pm 1\%$), and Patsari Portatil ($97 \pm 1\%$) fueron mayores que el TSF ($93 \pm 3\%$). MCEs para el TSF y la estufa ONIL fueron comparables entre este estudio y el reportado por (Jetter y col. 2012) y la MCE para la estufa Patsari también está en buen acuerdo con eficiencias de combustión reportadas [8]. El promedio de los EF ($gPM_{2.5}/kg$ de leña seca) para las cinco estufas de plancha fue $2.0 \pm 0.2 gPM_{2.5}/kg$ de leña seca el cual es 3 veces menor que el TSF ($6.1 \pm 2.2 gPM_{2.5}/kg$) y las diferencias entre las IWS y el TSF fueron estadísticamente significativas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

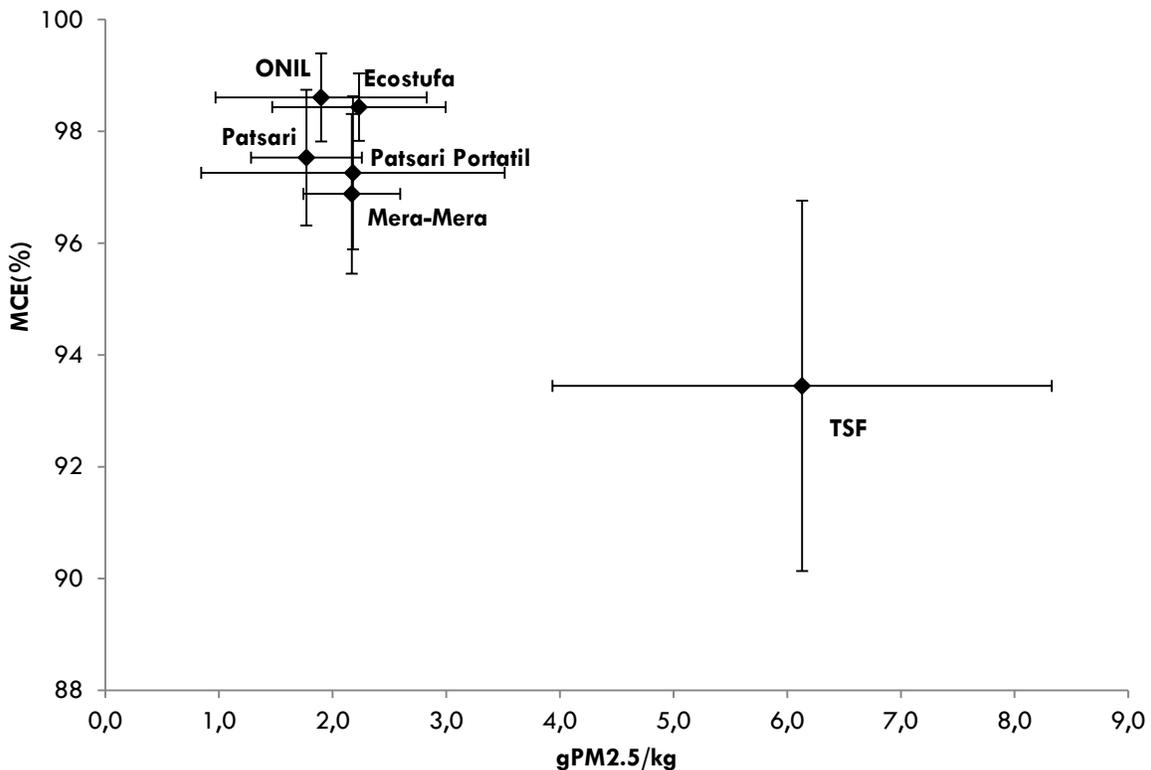


Figura 4.1 Factores de emisión de $PM_{2.5}$ y MCE para las IWS y el TSF.

4.1.2 Parámetros de rendimiento

La Tabla 4.2 muestra el promedio del consumo específico de combustible (SFC), eficiencia térmica (TE), potencia y tiempo de ebullición para las fases de alta y baja potencia de prueba WBT de las 5 estufas tipo plancha comparadas con el TSF. En la fase de alto poder, el TSF mostró el tiempo de ebullición más bajo con 20 ± 5 minutos el cual es similar al reportado por (Jetter y Kariher. 2009; Bailis y col. 2007) y el SFC fue 0.1 ± 0.1 kg/L el cual es similar al reportado por (Berrueta y col., 2008). Por otra parte, la eficiencia térmica para la estufa Patsari fue $12 \pm 1\%$, sin embargo, el TSF demostró una eficiencia térmica estadísticamente mayor lo cual fue también observado por (Bailis y col. 2007). Durante la fase de bajo poder, el SFC para el TSF fue 0.2 ± 0.1 kg/L el cual es estadísticamente diferente del consumo específico de combustible obtenido para cada una de las cinco IWS evaluadas.

Tabla 4.2. Parámetros de rendimiento de las IWS y TSF para ambas fases de la prueba WBT.

Fase	Estufa	N	SFC (kg/L)	valor p	TE (%)	valor p	P (kW)	valor p	Tiempo de ebullición (min)	valor p
Fases de alta potencia	TSF	10	0.1 ± 0.1	-	15 ± 1	-	11 ± 3	-	20 ± 5	-
	Patsari	10	0.2 ± 0.1	< 0.01	12 ± 1	< 0.01	10 ± 2	0.60	43 ± 15	< 0.01
	Patsari Portátil	10	0.3 ± 0.1	< 0.01	8 ± 1	< 0.01	11 ± 2	0.86	38 ± 11	< 0.01
	Mera-Mera	10	0.2 ± 0.1	0.25	16 ± 3	0.47	9 ± 1	< 0.01	48 ± 13	< 0.01
	Ecostufa	10	0.1 ± 0.1	0.29	19 ± 3	< 0.01	9 ± 2	0.75	36 ± 12	< 0.01
	ONIL	10	0.2 ± 0.1	0.05	15 ± 2	0.60	8 ± 2	0.03	62 ± 28	< 0.01
Fase de baja potencia	TSF	5	0.2 ± 0.1	-	15 ± 1	-	4 ± 1	-	45 ± 0	-
	Patsari	5	0.1 ± 0.1	0.03	13 ± 1	0.01	7 ± 1	< 0.01	45 ± 0	-
	Patsari Portátil	5	0.1 ± 0.1	0.01	11 ± 1	< 0.01	7 ± 1	< 0.01	45 ± 0	-
	Mera-Mera	5	0.1 ± 0.1	< 0.01	22 ± 1	< 0.01	6 ± 1	< 0.01	45 ± 0	-
	Ecostufa	5	0.1 ± 0.1	0.01	20 ± 1	0.01	6 ± 1	< 0.01	45 ± 0	-
	ONIL	5	0.1 ± 0.1	< 0.01	17 ± 2	0.08	5 ± 1	0.01	45 ± 0	-

Notas: Las cinco IWS fueron comparadas contra el TSF utilizando la distribución t con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

4.1.3 Desempeño de la estufa ONIL

La comparación de los parámetros de rendimiento y de emisiones de la estufa ONIL con la plancha y removiendo los anillos de la superficie de la plancha se muestra en la Tabla 4.3. La estufa ONIL sin anillos demostró una reducción del 20% y 30% en el SFC y tiempo de ebullición, respectivamente así como un incremento del 20% en la eficiencia térmica como resultado de la mejora en la transferencia de calor comal/olla. Sin embargo, el promedio de las emisiones totales de CO y PM_{2.5} y la relación de emisiones de CO de la estufa ONIL sin anillos fue 2.6, 1.3 y 3.2 veces mayor que la ONIL, respectivamente, y las diferencias entre las estufas fueron estadísticamente significativas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Cuando los anillos se remueven de la plancha de la estufa la temperatura de la zona de combustión disminuye ocasionando que el tiro de la chimenea se reduzca sustancialmente, lo cual reduce el flujo de aire en la estufa y por tanto la MCE.

Tabla 4.3 Comparación del rendimiento energético y de emisiones de la estufa ONIL.

Fase	Estufa	N	SFC (kg/L)	TE (%)	P (kW)	Tiempo de ebullición (min)	MCE(%)	g(c)CO/kg(c)CO ₂	gCO ¹	gPM _{2.5} ¹
Fase de alta potencia	ONIL	10	0.2 ± 0.1	15 ± 2	8 ± 2	62 ± 28	99 ± 1	13 ± 7	20 ± 9	3.0 ± 1.1
	ONIL S/N anillos	10	0.1 ± 0.1	21 ± 3	7 ± 2	44 ± 14	95 ± 2	49 ± 18	55 ± 16	3.9 ± 1.0
	p-value			0.04	< 0.01	0.28	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Fase de bajo poder	ONIL	5	0.1 ± 0.1	17 ± 2	5 ± 1	45 ± 0	98 ± 1	17 ± 10	14 ± 8	1.6 ± 0.5
	ONIL S/N anillos	5	0.1 ± 0.1	19 ± 4	4 ± 1	45 ± 0	96 ± 1	38 ± 11	29 ± 9	2.8 ± 1.8
	p-value			0.23	0.36	0.15	-	0.01	0.02	0.03

Nota: Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ para comparar el rendimiento de la estufa ONIL.

¹ Emisiones totales por cada fase completada.

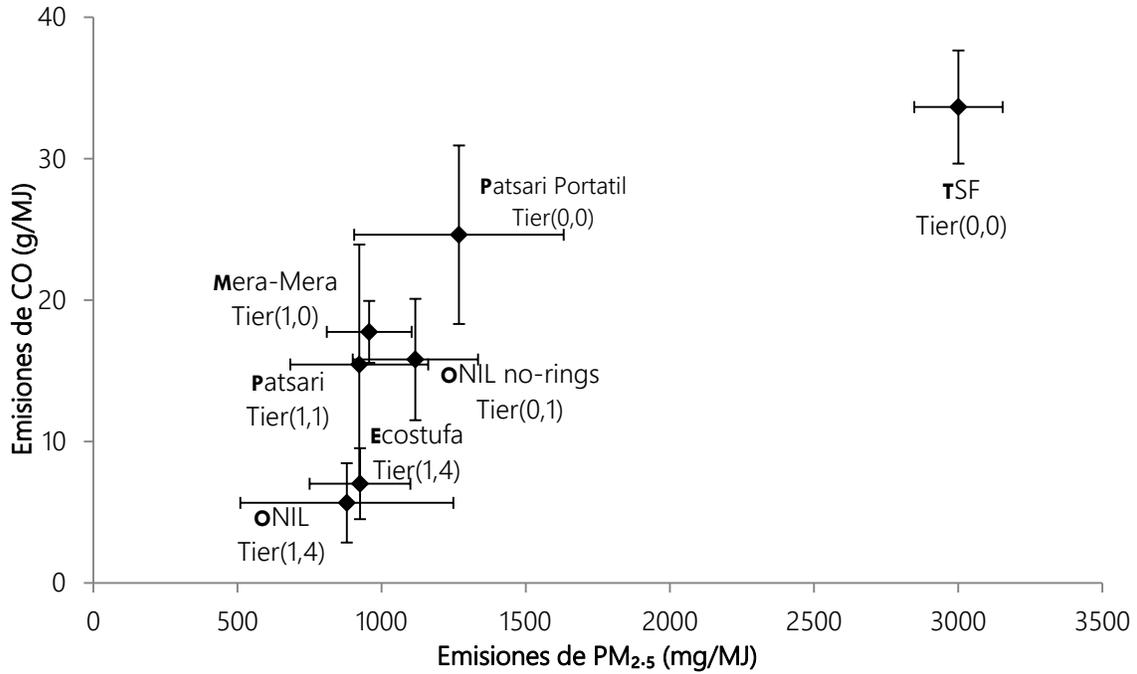
Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

4.1.4 Parámetros de rendimiento IWA

Las Figuras 4.2 y 4.3 y la Tabla 4.4 comparan las diferentes estufas evaluadas en términos de los parámetros IWA de eficiencia y emisiones.

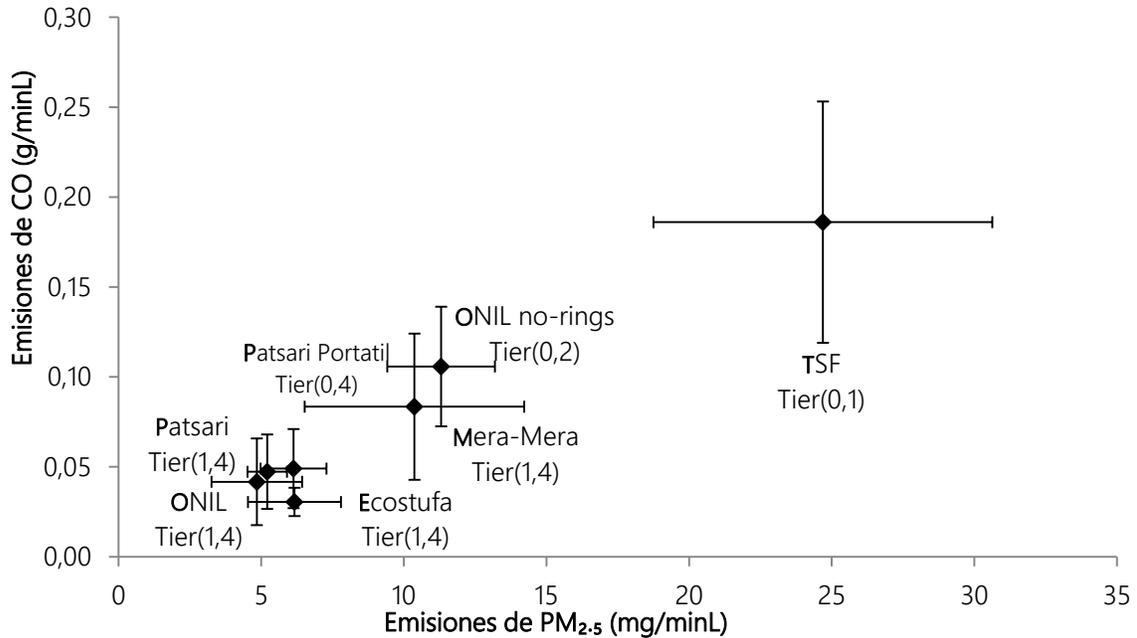
Eficiencia. La mayor eficiencia térmica alcanzada por las estufas tipo plancha fue la ONIL sin anillos con Tier 1 ($21 \pm 1\%$), el resto de las estufas tipo plancha con superficies metálicas separando la zona de combustión de la olla fueron Tier 0.

Emisiones. Para las emisiones de CO, durante la fase de alto poder, los Tier fueron de 0 para las estufas Patsari Portátil y Mera-Mera, a 4 para la ONIL y Ecostufa. Para la fase de bajo poder, la mayoría de las estufas alcanzó Tier 4. En relación con las emisiones de PM_{2.5}, la mayoría de las estufas alcanzaron Tier 1 en ambas fases alto y bajo poder. Emisiones al interior. Las emisiones fugitivas (al interior) representan aquellas emisiones provenientes del cuerpo de la estufa (Jetter y col. 2012) las cuales se cuantificaron en pruebas WBT subsecuentes a las presentadas en este trabajo de investigación. Los resultados muestran que las emisiones fugitivas representan $1 \pm 0.3\%$ (Ruiz, Comunicación Personal) de las emisiones totales. Utilizando este valor para estimar las emisiones fugitivas de CO y PM_{2.5} se obtiene un Tier de 4 para ambos contaminantes para todas las IWS evaluadas. Bajo los supuestos considerados, la reducción en la exposición a emisiones de CO y PM_{2.5} se puede traducir en un beneficio para la salud de los usuarios de IWS tipo plancha provistas con chimenea.



Nota: Las barras de error representan ± desviación estándar

Figura 4.2 Valores Tier para emisiones durante la fase de alta potencia para las IWS y TSF.



Nota: Las barras de error representan ± desviación estándar

Figura 4.3 Valores Tier para emisiones durante la fase de baja potencia para las IWS y TSF.

Tabla 4.4 Valores Tier para los parámetros de rendimiento IWA de las estufas tipo plancha y TSF.

Parámetros de rendimiento IWA Tier	unidades	TSF	Tier	Patsari	Tier	Patsari Portatil	Tier	Mera-Mera	Tier	Ecostufa	Tier	ONIL	Tier	ONIL S/N anillos	Tier
Eficiencia térmica alta potencia	%	15 ± 1	0	12 ± 1	0	8 ± 1	0	16 ± 3	0	19 ± 3	1	15 ± 2	1	21 ± 3	1
Consumo específico bajo poder	MJ/min/L	0.2 ± 0.1	0	0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	0	0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	2	0.1 ± 0.1	1
Emissiones CO alta potencia	g/MJd	34 ± 4	0	15 ± 9	1	25 ± 6	0	18 ± 2	0	7 ± 3	4	6 ± 3	4	16 ± 4	1
Emissiones CO bajo poder	g/min/L	0.2 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	2
Emissiones PM _{2.5} alta potencia	mg/MJd	3001 ± 156	0	923 ± 239	1	1268 ± 363	0	957 ± 147	1	925 ± 175	1	879 ± 370	1	1117 ± 217	0
Emissiones PM _{2.5} bajo poder	mg/min/L	25 ± 6	0	5 ± 1	1	10 ± 3	0	6 ± 1	1	6 ± 2	1	5 ± 2	1	12 ± 11	0
Emissiones al interior CO ¹	g/min	2.3 ± 0.8	0	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4
Emissiones al interior PM _{2.5} ¹	mg/min	212 ± 72	0	0.6 ± 0.2	4	0.7 ± 0.1	4	0.6 ± 0.1	4	0.8 ± 0.2	4	0.5 ± 0.1	4	0.9 ± 0.1	4

Notas: Variabilidad expresada como ± desviación estándar. ¹ Las emisiones al interior de CO y PM_{2.5} se estimaron asumiendo que las emisiones fugitivas representan 1% de las emisiones totales basadas en mediciones reales de pruebas WBT.

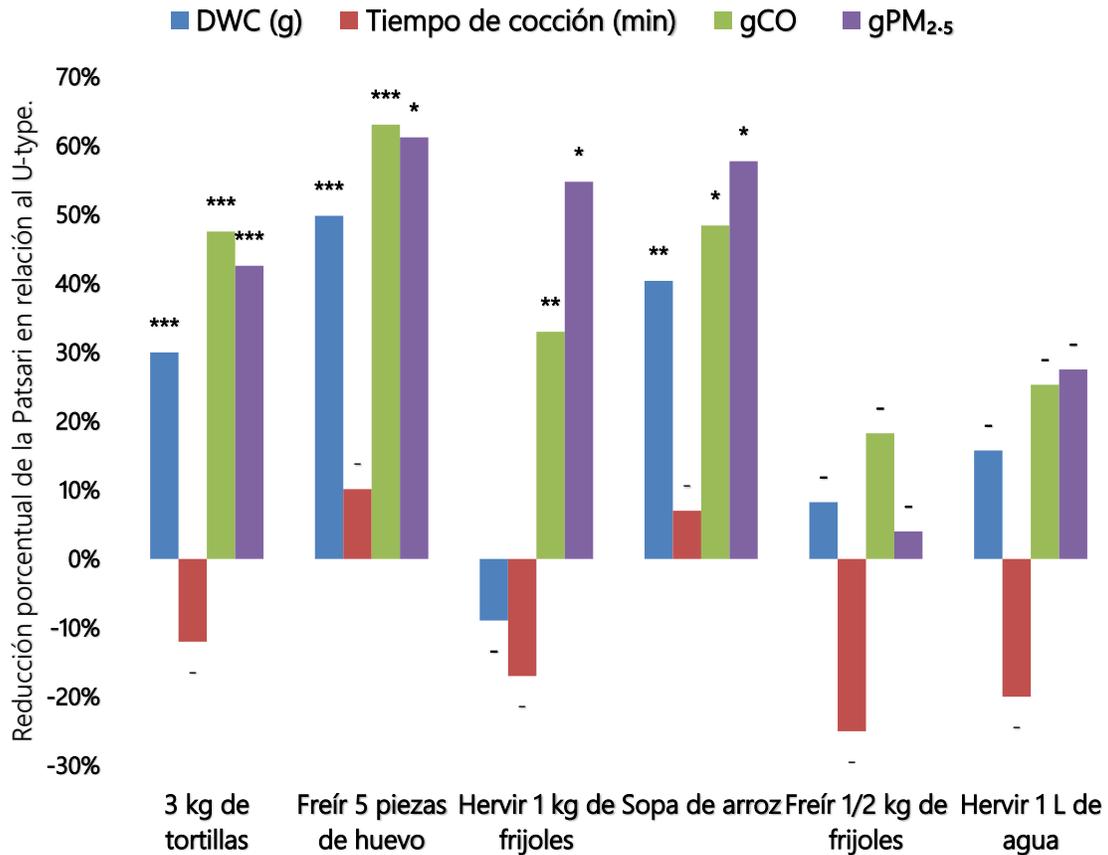
4.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)

4.2.1 Tareas individuales

La Figura 4.4 muestra los ahorros de consumo de combustible (DWC), tiempo de cocinado y la reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} de la estufa Patsari en relación al U-type. En la Tabla 4.5 se reportan los valores promedio tanto de los parámetros de rendimiento como de la contribución de emisiones de la Patsari y el U-type.

3 kg de tortillas. La estufa Patsari presentó un SFC de 0.5 ± 0.1 kg/kg el cual es comparable con lo reportado por (Berrueta y col., 2008; Bailis y col., 2007). Los ahorros de consumo de combustible y la reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} observada en la Patsari en relación al U-type fueron estadísticamente significativa con 30% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), 48% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$) y 43% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$), respectivamente. Freír 5 piezas de huevo. Se observaron ahorros significativos de leña del 50% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y la reducción de emisiones de CO y de PM_{2.5} respecto al U-type fue de 63% ($p = 0.02$, $\alpha = 0.05$) y 61% ($p = 0.08$, $\alpha = 0.10$), respectivamente. Hervir 1 kg de frijoles. No se observó un ahorro significativo de combustible en la estufa Patsari respecto al U-type, sin embargo, la reducción de emisiones en la estufa eficiente fue estadísticamente significativa con 33% ($p = 0.02$, $\alpha = 0.05$) para CO y de 55% ($p = 0.07$, $\alpha = 0.10$) para PM_{2.5}. Sopa de arroz. La estufa Patsari presentó ahorros estadísticamente significativos durante la elaboración de esta tarea de cocinado en consumo de combustible y emisiones de CO y PM_{2.5} con 40% ($p = 0.07$, $\alpha = 0.10$), 48% ($p = 0.09$, $\alpha = 0.10$) y 58% ($p = 0.08$, $\alpha = 0.10$), respectivamente. Freír frijoles y hervir 1 L de agua. El rendimiento de la Patsari en relación al U-type fue similar para estas tareas de cocinado no encontrándose diferencias estadísticamente significativas de los parámetros evaluados ($p > 0.10$).

En general, las diferencias en el tiempo de cocinado de la estufa Patsari respecto al U-type para cinco tareas individuales evaluadas no fueron estadísticamente significativas siendo el valor p mayor de 0.10 (10%) en todos los casos.



Notas: La reducción porcentual marcada con ***, ** y * sobre las barras indican que las diferencias entre la estufa Patsari y el U-type son estadísticamente significativas con $\alpha = 0.01$, $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.10$, respectivamente. Las barras sobre las cuales se colocó un guion (-) indican que la diferencia no es significativa es decir ($p > 0.10$).

Figura 4.4 Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación al U-type durante las tareas individuales CCT.

Tabla 4.5 Parámetros de rendimiento y contribución de emisiones para la estufa Patsari y U-type durante las tareas individuales.

Tarea	Estufa	N	DWC	SFC	Tiempo de cocinado	Emisiones totales	
			g	kg/kg	min	gCO	gPM2.5
Tortillas	Patsari	6	1281 ± 139	0.5 ± 0.1	51 ± 6	60 ± 7	2.5 ± 0.5
	U-type	6	1829 ± 117	0.7 ± 0.1	45 ± 6	115 ± 33	4.4 ± 1.0
	valor p		< 0.01***	< 0.01***	0.13	0.01***	0.01***
Freír 5 huevos	Patsari	6	438 ± 30	1.8 ± 0.2	19 ± 6	14 ± 5	1.1 ± 0.4
	U-type	6	872 ± 73	3.7 ± 0.5	21 ± 8	38 ± 14	2.9 ± 2.0
	valor p		< 0.01***	< 0.01***	0.62	0.02**	0.08*
Hervir 1 kg de frijoles	Patsari	3	4425 ± 429	0.9 ± 0.3	166 ± 23	270 ± 18	10 ± 1
	U-type	3	4062 ± 388	1.1 ± 0.3	138 ± 10	354 ± 50	21 ± 8
	valor p		0.34	0.81	0.15	0.10*	0.07*
Sopa de arroz	Patsari	3	1626 ± 201	0.9 ± 0.1	57 ± 8	65 ± 14	6 ± 1
	U-type	3	2728 ± 480	1.3 ± 0.3	61 ± 14	126 ± 36	15 ± 3
	valor p		0.07*	0.15	0.65	0.09*	0.08*
Freír ½ kg de frijoles	Patsari	3	688 ± 182	1.2 ± 0.3	28 ± 14	20 ± 18	2.2 ± 0.9
	U-type	3	750 ± 139	1.4 ± 0.4	21 ± 3	25 ± 5	2.3 ± 0.5
	valor p		0.67	0.52	0.23	0.66	0.42
Hervir 1 L de agua	Patsari	3	920 ± 173	0.9 ± 0.2	30 ± 9	33 ± 12	3.6 ± 1.2
	U-type	3	1092 ± 54	1.1 ± 0.1	24 ± 6	44 ± 3	5.0 ± 1.1
	valor p		0.22	0.38	0.06	0.23	0.21

Notas: La estufa Patsari fue comparada en relación al U-type utilizando *** $\alpha = 0.01$, ** $\alpha = 0.05$ and * $\alpha = 0.10$. Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

4.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)

4.3.1 CBC para estufa Patsari, U-type y TSF

La Tabla 4.6 muestra el desempeño energético y la contribución de emisiones de la estufa Patsari, U-type y TSF durante el ciclo de cocinado controlado. Se encontró una reducción de emisiones estadísticamente significativa para la estufa Patsari en relación al TSF con 78% para el CO ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y de 74% para $PM_{2.5}$ ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y de 65% ($p \leq 0.01$, $\alpha = 0.01$) para ambos contaminantes respecto al U-type. Por otra parte, se encontraron ahorros de combustible significativamente estadísticos del 35% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y 40% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) en relación al U-type y al TSF, respectivamente. Los ahorros de leña en relación al TSF son comparables con los obtenidos mediante pruebas de campo KPT realizadas por Miranda (2015) y Berrueta y col., (2008).

De la misma forma que durante la evaluación de las tareas individuales CCT, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en los tiempos de cocinado de la estufa Patsari respecto al U-type ($p = 0.52$) y al TSF ($p = 0.58$). Las MCEs de la estufa Patsari, U-type y TSF durante el CBC fueron de $96 \pm 1\%$, $92 \pm 1\%$ y $89 \pm 3\%$ siendo las diferencias entre los fogones y la Patsari estadísticamente significativas ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$). Los EF para la estufa Patsari para CO y $PM_{2.5}$ fueron de 20 ± 3 g(c)CO/kg y 1.5 ± 0.9 g(c) $PM_{2.5}$ /kg, respectivamente, los cuales son estadísticamente diferentes ($p < 0.10$) de los factores de emisión obtenidos para ambos fogones. Las MCEs y los EF para CO y $PM_{2.5}$ tanto para la Patsari como para los fogones son similares a los reportados por (Johnson y col., 2008) durante un día normal de cocinado.

Tabla 4.6 Parámetros de rendimiento y contribución de emisiones para la estufa Patsari, U-type y TSF durante ambos ciclos de cocinado.

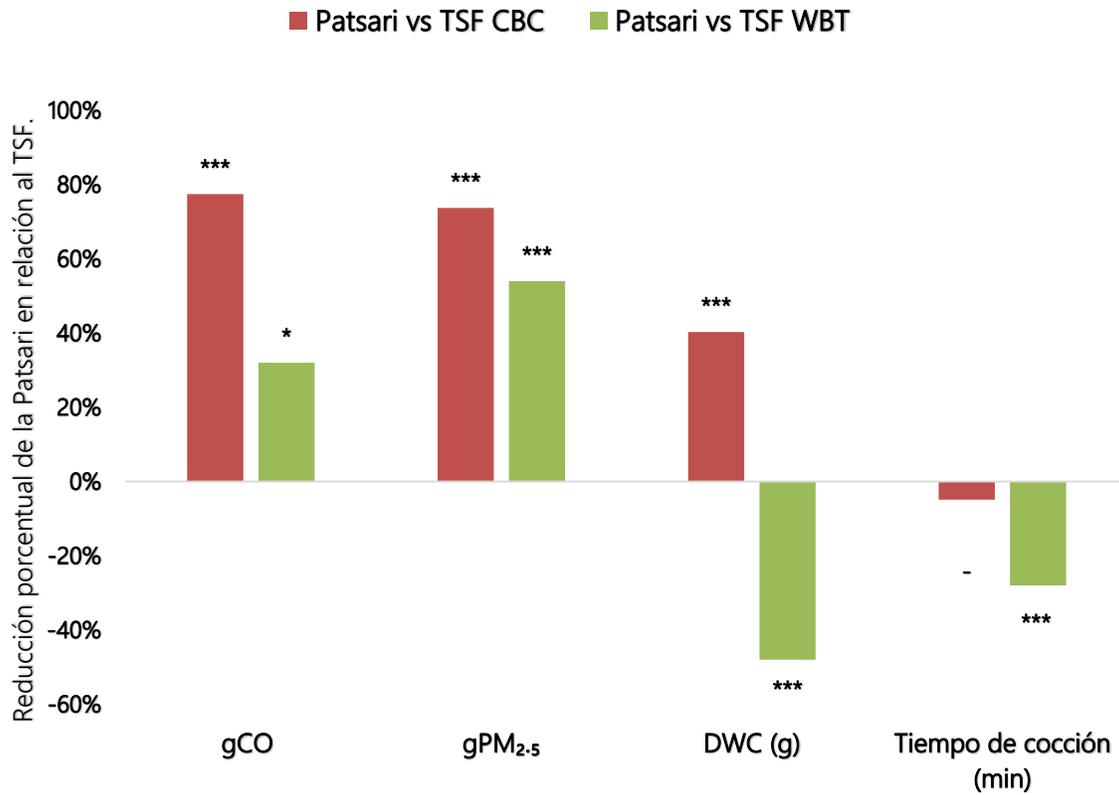
Task	Stove	N	DWC	SFC	Cooking time	Total emissions		Emission factors		MCE
			g	kg/kg	min	gCO	gPM2.5	g(c)CO/kg	g(c)PM2.5/kg	%
CBC	Patsari	5	3066 ± 276	0.5 ± 0.1	110 ± 17	143 ± 34	9 ± 2	20 ± 3	1.5 ± 0.9	96 ± 1
	U-type	5	4718 ± 463	0.7 ± 0.1	103 ± 12	408 ± 82	26 ± 8	30 ± 5	5.5 ± 1.6	92 ± 1
	TSF	5	5188 ± 613	0.8 ± 0.1	104 ± 10	636 ± 143	34 ± 21	41 ± 11	6.3 ± 3.5	89 ± 3
valor p en relación al U-type			< 0.01***	< 0.01***	0.52	< 0.01***	0.01***	0.01***	0.03**	< 0.01***
valor p en relación al TSF			< 0.01***	< 0.01***	0.58	< 0.01***	0.01***	0.02**	0.04**	< 0.01***

Notas: La comparación entre la estufa Patsari y los fogones tradicionales se realizó mediante la distribución t con los niveles de significancia *** $\alpha = 0.01$ y ** $\alpha = 0.05$.

Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

4.3.2 Rendimiento de la Patsari en CBC y WBT en relación al TSF

La Figura 4.5 muestra la comparación del rendimiento de la estufa Patsari en relación al TSF para completar el CBC y una prueba estándar WBT. Mientras que la Patsari consume 38% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$) más combustible que el TSF para completar las tres fases de la prueba WBT, durante el CBC se alcanzaron ahorros de combustible del 40% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$). Por otra parte, la reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} en la Patsari en relación al TSF fue de 78% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) and 74% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), respectivamente. Durante la prueba WBT la disminución de emisiones también estadísticamente significativa pero menor con 32% para CO ($p \leq 0.1$, $\alpha = 0.10$) y 54% para PM_{2.5} ($p \leq 0.01$, $\alpha = 0.01$). Las diferencias en el tiempo de cocinado de la Patsari respecto a ambos fogones para completar el CBC no fueron estadísticamente significativas, sin embargo, la Patsari necesitó un 35% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) más de tiempo de ebullición para completar la prueba WBT.

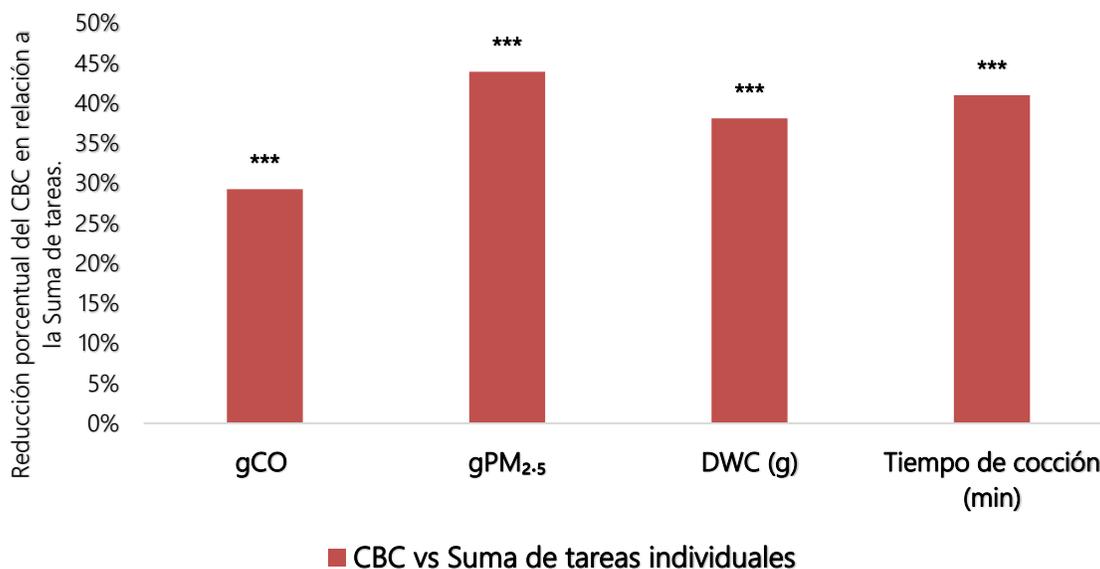


Nota: La reducción porcentual marcada con *** y * sobre las barras indican que las diferencias son estadísticamente significativas con $\alpha = 0.01$ y $\alpha = 0.10$, respectivamente. – indica que no existe diferencia significativa.

Figura 4.5 Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación al TSF durante el CBC y WBT.

4.3.3 CBC vs Suma de tareas individuales en estufa Patsari

La Figura 4.6 muestra una comparación de la estufa Patsari en relación a la estufa misma para completar el CBC y durante la suma de tareas individuales. Para realizar dicha comparación la contribución en consumo de leña, tiempo de cocinado y emisiones de CO y PM_{2.5} de las tareas de tortillas, freír 5 piezas de huevo, sopa de arroz, freír frijoles y hervir 1 L de agua se sumaron para obtener la contribución total en cada uno de los cuatro parámetros mencionados. Los resultados muestran que la estufa Patsari durante el CBC en relación a la suma de tareas presentó ahorros estadísticamente significativos de consumo de combustible y tiempo de cocinado con 38% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y 43% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), respectivamente. Adicionalmente, se observó una reducción de emisiones en el CBC de 30% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) y 44% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) para las emisiones de CO y PM_{2.5}, respectivamente.



Nota: Las barras marcadas con *** indican que las diferencias son estadísticamente significativas con un nivel de significancia $\alpha = 0.01$

Figura 4.6 Porcentajes de reducción de la estufa Patsari en relación a la misma estufa durante el CBC y la Suma de tareas individuales.

La Tabla 4.7 muestra los valores promedio de donde se extrajeron los porcentajes de reducción presentados en las Figuras 4.5 y 4.6.

Tabla 4.7 Rendimiento de la estufa Patsari mediante diferentes niveles de comparación.

Tarea	Estufa	N	DWC	Tiempo de cocción	Emisiones totales	
			g	min	gCO	gPM _{2.5}
CBC	Patsari	5	3066 ± 276	110 ± 17	143 ± 34	9 ± 2
Suma de tareas	Patsari	-	4952 ± 725	185 ± 42	203 ± 56	16 ± 4
valor p			< 0.01***	< 0.01***	< 0.01***	< 0.01***
%			38	41	29	44
CBC	Patsari	5	3066 ± 276	110 ± 17	143 ± 34	9 ± 2
	TSF	5	5188 ± 613	104 ± 10	636 ± 143	34 ± 21
valor p			< 0.01***	0.58	< 0.01***	< 0.01***
%			40	-5	77	74
WBT*	Patsari	5	4007 ± 1154	131 ± 16	102 ± 58	7 ± 2
	TSF	5	2479 ± 259	85 ± 11	151 ± 71	15 ± 7
valor p			< 0.01***	< 0.01***	0.09*	< 0.01***
%			-48	-35	32	54

Nota: La estufa Patsari se comparó en relación a si misma y al TSF utilizando *** $\alpha = 0.01$ y * $\alpha = 0.10$. El % se refiere a la reducción porcentual obtenida para cada uno de los parámetros.

Variabilidad expresada como \pm desviación estándar.

* El DWC, tiempo de cocinado y las emisiones totales de CO y PM_{2.5} se calcularon como la suma del parámetro para cada fase de la prueba WBT (e.g. $gCO = \overline{gCO}_{frio} + \overline{gCO}_{caliente} + \overline{gCO}_{summer}$).

En el Apéndice D, Tabla D2, se reportan los valores estadísticos obtenidos durante los diferentes niveles de comparación de la estufa Patsari mostrados en las secciones 4.2 y 4.3 de este trabajo de investigación.

4.4 Discusión de resultados

4.4.1 Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

Emisiones

En general, las cinco IWS tipo plancha evaluadas presentaron reducciones sustanciales de emisiones totales de hasta un 67% para CO y de un 63% para PM_{2.5} así como MCEs significativamente mayores en comparación con el TSF. La posible explicación de estos resultados es que en la configuración del dispositivo tradicional no se alcanzan las temperaturas suficientes para completar cada una de las fases del proceso de combustión de biomasa a diferencia de las IWS en las cuales la cámara de combustión juega un papel crucial para almacenar la energía liberada por la leña y con ello lograr que las temperaturas sean las adecuadas para mejorar significativamente la eficiencia de combustión.

Adicionalmente, se observó una notoria diferencia en la contribución de emisiones en las fases de alta y baja potencia de la prueba WBT en las IWS la cual se explica a continuación. En las fases de alta potencia la cámara de combustión de las estufas tipo plancha tienden a estar 'sobrecargada' con combustible para alcanzar el punto de ebullición en el menor tiempo posible lo cual restringe el flujo de aire para completar el proceso de combustión de la leña y por ende la eficiencia de combustión tiende a decrecer. Durante las pruebas de baja potencia, las estufas tipo plancha presentaron una contribución de emisiones significativamente menor, en relación a las fases previas, debido a que el flujo de aire en la zona de combustión es suficiente para quemar los gases combustibles disponibles lo que mejora sustancialmente la MCE.

Rendimiento

En general, durante las pruebas WBT las cinco estufas eficientes tipo plancha mostraron bajas eficiencias energéticas, comparables o incluso menores que el TSF, confirmando lo anterior con estudios previos (Jetter y col. 2012). Las posibles razones de estos resultados son las siguientes:

1. La prueba WBT subestima la TE real de estas estufas debido a que sólo una pequeña parte de la transferencia de calor del comal se utiliza para hervir el agua (Chung y col. 2001).
2. Debido a que las estufas Patsari, Patsari Portátil y ONIL están construidas con materiales cerámicos, el cuerpo de la estufa absorbe parte de la energía liberada por el combustible en lugar de ser transferida a la tarea (Jetter y Kariher., 2009).
3. Cuando una plancha separa la zona de combustión de la olla, no se alcanza una alta potencia de cocinado y una adecuada eficiencia de transferencia de calor en la estufa.

Los esfuerzos actuales por solucionar estas deficiencias en el WBT incluyen realizar las pruebas con un contacto del agua del 60% del área superficial de la plancha utilizando una olla poco profunda (llamada "*comal-olla*") cubriendo toda la superficie del comal para representar de forma más adecuada la eficiencia real de transferencia de calor de la plancha. Sin embargo, el cocinado real involucra muchos factores los cuales no se reflejan en pruebas de laboratorio de hervir agua (Dutt y Ravindranath., 1993; Chen y col., 2012; Johnson y col., 2010), razón por la cual las pruebas WBT no son representativas de la realidad de las comunidades rurales (Edwards., 2006) con lo cual se puede concluir que son necesarias las evaluaciones en campo las cuales reflejen el desempeño real de las IWS tipo plancha.

4.4.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT)

Los resultados mostraron que el rendimiento de la estufa Patsari en relación al U-type depende de las características de cocinado de las diferentes tareas y del uso efectivo tanto de la superficie de transferencia como de la potencia de cocinado lo cual se traduce en una variación en términos de consumo de combustible, tiempos de cocinado y contribución de emisiones de CO y PM_{2.5}.

La estufa Patsari presentó ahorros de combustible y una reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} estadísticamente significativos en relación al U-type durante las tareas de cocinado individual de tortillas, freír huevos y en la elaboración de sopa de arroz. La posible explicación es que la potencia de cocinado de la Patsari se utilizó de forma eficiente para alcanzar ese rendimiento en la estufa lo que concuerda con lo reportado por (Jetter y col., 2012). En contraste, la estufa Patsari presentó un elevado consumo de combustible durante la tarea de hervir frijoles como resultado de la pobre transferencia de calor comal-olla durante un periodo prolongado de tiempo de cocinado. La contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} durante esta tarea fue significativamente diferente al resto de las tareas de cocinado lo cual se puede explicar debido a una baja relación aire/combustible y a las condiciones humeantes de baja temperatura (Arora y col., 2014) presentes en la cocción de frijoles. La contribución de PM_{2.5} en tareas de tiempo de cocción corto se puede explicar debido a que la mayoría de las emisiones de material particulado ocurren al inicio del proceso de combustión de la leña (MacCarty y col., 2008b). Las diferencias en el tiempo de cocinado entre la estufa Patsari y el U-type no fueron significativas lo que se puede explicar debido al material de construcción de la estufa en el cual parte de la energía liberada por el combustible es absorbido por el cuerpo de la estufa en lugar de transferirse a la tarea de cocinado (Jetter y Kariher., 2009).

4.4.3 Ciclo de Cocinado Controlado (CBC)

La estufa Patsari presentó una reducción sustancial y estadísticamente significativa de emisiones de CO y PM_{2.5} en relación a ambos fogones lo cual se puede explicar debido a que en la zona de combustión se optimizan variables tales como la relación aire/combustible, tiempo de residencia y el tiro en la chimenea a través del cuerpo de la estufa (MacCarty y col., 2008b) lo cual mejora sustancialmente la eficiencia de combustión a lo largo del ciclo de cocinado. Por otra parte, mediante la secuencia de cocción del CBC, basada en las prácticas de cocción comunes de los usuarios, se alcanzaron ahorros de combustible significativos lo cual se puede explicar debido al uso óptimo de la superficie del comal principal de la Patsari lo que se traduce en una mejora significativa de la transferencia de calor a los alimentos cuando se cocina más de un platillo. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de cocinado de la Patsari y ambos fogones a pesar de que en el dispositivo tradicional se utilice el fuego directo, lo que mejora la transferencia de calor por convección y radiación, lo cual es un hallazgo de fundamental importancia ya que el tiempo de cocción es una de las variables de mayor peso desde el punto de vista de los usuarios (Adkins y col., 2010).

Beneficios de la integración de tareas

La secuencia de cocinado integrada y simultánea resultó en ahorros significativos de consumo de combustible y tiempo de cocinado para la estufa Patsari comparado con el cocinado individual en la misma estufa. Lo anterior demuestra los beneficios de la multi-cocción de alimentos lo que permite aprovechar al máximo el calor liberado por la estufa tanto en el comal principal como en las hornillas secundarias lo que a su vez optimiza el consumo de combustible.

WBT vs CBC

La comparación del rendimiento de la estufa Patsari en relación al TSF mediante pruebas WBT y durante el CBC mostró que el desempeño de dicha IWS se subestima significativamente mediante pruebas WBT.

Lo anterior se puede visualizar especialmente en el consumo de combustible donde se observó la mayor diferencia entre pruebas WBT y CBC. La posible explicación es que las IWS tipo plancha como la Patsari presentan un pobre desempeño térmico para hervir grandes cantidades de agua debido a una pobre transferencia de calor comal-olla lo que se traduce en un consumo significativo de combustible en comparación con el TSF (Medina y col., 2017). En el CBC, por otra parte, los ahorros significativos de leña de la Patsari en relación al TSF son posiblemente debido a la mejora sustancial de la transferencia de calor como se explicó anteriormente. La reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} de la Patsari respecto al TSF durante el CBC fue mayor a la obtenida aplicando pruebas WBT. MacCarty y col., 2008b, reportaron una tendencia similar cuando compararon la reducción de emisiones de una estufa de plancha provista con chimenea en relación al TSF durante pruebas WBT y de cocinado real en campo. Este hallazgo puede tener una implicación crucial para resaltar la importancia de las mediciones en campo de consumo de combustible y de reducción de emisiones de las IWS tipo plancha.

En términos generales, los ahorros de combustible y la reducción de emisiones de la estufa Patsari en comparación en el dispositivo tradicional fueron comparables con el rendimiento observado durante mediciones de campo lo cual es importante para determinar la representatividad del CBC diseñado en este estudio en comparación con un día normal de cocinado de un hogar rural de la región rural de Michoacán, México.

Capítulo 5

Conclusiones

El presente trabajo de investigación presenta la base de datos más completa en términos de contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} de las IWS tipo plancha que existen en nuestro país. El hallazgo principal de este trabajo es que las IWS presentaron una reducción de emisiones estadísticamente significativa en relación al dispositivo tradicional utilizando 3 enfoques de evaluación diferentes. Mediante un ciclo de cocinado controlado se alcanzaron las mayores reducciones de CO y PM_{2.5} con lo cual se reafirma la hipótesis planteada al inicio de esta investigación. A continuación se muestran los puntos medulares de cada una de las pruebas:

WBT

- Las IWS tipo plancha presentaron una reducción estadísticamente significativa de emisiones de CO y PM_{2.5} en relación al TSF durante las pruebas WBT. Lo anterior se observó especialmente durante la fase de baja potencia debido a que el flujo de aire en la cámara de combustión es suficiente para quemar los gases combustibles y completar el proceso de combustión.
- Las IWS de plancha presentan un elevado SFC en las fases de alta potencia debido a que el comal principal limita sustancialmente la transferencia de calor. Sin embargo, en la fase de baja potencia las estufas de plancha reportaron mejoras sustanciales en ahorro de combustible.
- Mediante el uso del fuego directo se pueden alcanzar ahorros en parámetros de desempeño como consumo de combustible y tiempo de cocinado, sin embargo, la contribución de emisiones se incrementa considerablemente como resultado de que no se alcanza las condiciones óptimas de combustión.

- Los resultados de los parámetros IWA mostraron que las IWS provistas con chimenea presentaron Tier 4 en las emisiones al interior de CO y PM_{2.5} lo que se traduce en una mejora en la calidad de vida de los usuarios de estufas eficientes en relación al uso del TSF.

CCT

- Los resultados mostraron que el rendimiento de la estufa Patsari en relación al U-type depende de las características de cocinado de las diferentes tareas y del uso efectivo tanto de la superficie de transferencia como de la potencia de cocinado lo cual se traduce en una variación en términos de consumo de combustible, tiempos de cocinado y contribución de emisiones de CO y PM_{2.5}.

CBC

- La estufa Patsari presentó una reducción sustancial y estadísticamente significativa de emisiones de CO y PM_{2.5} en relación tanto al U-type como al TSF durante la aplicación de un ciclo de cocinado regional.
- Los ahorros de combustible y la reducción de emisiones de CO y PM_{2.5} de la estufa Patsari en relación al dispositivo tradicional durante el CBC fueron comparables con pruebas KPT y medición de emisiones en hogares rurales lo cual muestra la representatividad del ciclo de cocción diseñado en este estudio.
- El desempeño de la estufa Patsari en relación al TSF se subestima significativamente mediante pruebas WBT lo que resalta la importancia de las mediciones en campo de consumo de combustible y de reducción de emisiones de las estufas tipo plancha.

- Mediante el uso de una secuencia de cocinado simultánea e integrada en la estufa Patsari se puede optimizar el consumo combustible y el tiempo de cocinado así como reducir significativamente las emisiones de CO y PM_{2.5} en relación al cocinado individual en la misma estufa.

Recomendaciones

Los resultados presentados son una importante contribución al estado del arte de la evaluación del desempeño de las IWS tipo plancha, si bien utilizar el CBC como una herramienta para evaluar el rendimiento de dichas estufas representa el primer estudio en su tipo, aún existen enfoques por explorar:

- Debido al creciente interés en la mitigación del cambio climático es necesaria la evaluación de las IWS y fogón tradicional para determinar su contribución en emisiones de gases con un importante potencial de calentamiento tales como CH_4 (metano) y EC (carbono negro) durante mediciones en campo.
- Futuros estudios deben examinar la relación existente entre pruebas de laboratorio y campo en términos de emisiones y consumo de leña así como desarrollar otros ciclos de cocinado típicos de otros países de Latino América.
- Existe la necesidad de introducir nuevos diseños en los comales de las IWS tipo plancha los cuales mejoran la transferencia de calor de la superficie de transferencia con métodos como el 'comal-olla'. De otra forma, el rendimiento térmico de este tipo de IWS seguirá siendo sub-estimado.
- Es necesario desarrollar e implementar protocolos para evaluar las emisiones contaminantes al interior, en condiciones de laboratorio y sobre todo en evaluaciones de campo, las cuales tienen un impacto directo en la salud de los usuarios. Con lo anterior se pueden estimar las tasas de emisión de CO y $\text{PM}_{2.5}$ necesarias para alcanzar los objetivos actuales de la Organización Mundial de la Salud para estufas eficientes provistas de ventilación.

- Finalmente, el CBC se podría integrar como un protocolo de evaluación intermedia entre laboratorio y campo para determinar el rendimiento de las IWS lo cual como se observó en este trabajo refleja de manera muy aproximada el desempeño real de las estufas eficientes tipo plancha mediante pruebas de cocinado controlado.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Applus Autologic Inc., 2007, "Gas Analyzer Quick Start Guide". Document 910-0560.

Arora P., Jain S., Sachdeva K., 2013, "Physical characterization of particulate matter emitted from wood combustion in improved and traditional cookstoves". *Energy Sustainable Development*, 17(5), 497-503.

Arora P., Jain S., Sachdeva K., 2014, "Laboratory based assessment of cookstove performance using energy and emission parameters for North Indian cooking cycle", *Biomass and Bioenergy*, 69, 211-221.

Arora P. y Jain S., 2015, "Estimation of Organic and Elemental Carbon Emitted from Wood Burning in Traditional and Improved Cookstoves Using Controlled Cooking Test", *Environ. Sci. Technol.*, 49, 3958-3965.

Adkins E., Tyler E., Wang J., Siriri D., Modi V., 2010, "Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa", *Energy Sustain. Dev.*, 14, 172-185.

Anenberg S., 2012,. *Nature*, 490:343.

Arias T., 1993, "Manejo y consumo de leña en un municipio rural de subsistencia: Alcozauca, Guerrero", Tesis licenciatura en biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.

Bailis R., Berrueta V., Chengappa C., Dutta K., Edwards R., Masera O., Still D. y Smith K., 2007, "Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health Project", *Energy Sustainable Dev.*, 11, 57–70.

Berrueta V., Edwards R. y Masera O. R., 2008, "Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico", *Renewable Energy*, 33, 859–870.

Berrueta V., 2014, I Seminario Taller Latinoamericano de Cocinas/Estufas Limpias. "Promoviendo La Adopción y Uso Sostenible En Gran Escala", Lima, Peru.

Beyene A., Bluffstone R., Gebreegzhiaber Z., Martinsson P., Mekonnen A. y Vieider F, 2015, "Do Improved Biomass Cookstoves Reduce Fuelwood Consumption and Carbon Emissions? Evidence from Rural Ethiopia Using a Randomized Treatment Trial with Electronic Monitoring", *Policy Research Working Paper 7324*. <http://econ.worldbank.org>.

Bond T.C. y Sun H., 2005, "Can reducing black carbon emissions counteract global Warming?", *Environmental Science and Technology*, Volume 39, Issue 16, pp. 5921-5926.

Bruce N., Pérez-Padilla R. y Albalak R., 2000, "Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge", *Bulletin of the World Health Organization*, 78 (9), 1078-1092.

CCT., 2013, Controlled Cooking Test Version 2.0. Disponible en: Partnership for Clean Indoor Air. http://www.pciaonline.org/files/CCT_Version_2.0_0.pdf (accesado Junio 2013).

Chen Y., Roden C. A. y Bond T. C., 2012, "Characterizing Biofuel Combustion with Patterns of Real-Time Emission Data (PaRTED)", *Environ. Sci. Technol.*, 46, 6110–6117. doi: [dx.doi.org/10.1021/es3003348](https://doi.org/10.1021/es3003348).

Chung A., Chang D. P. Y., Kleeman M. J., Cahill T. A., Dutcher D., McDougall E. M. y Stroud K., 2001, "Comparison of real-time instruments used to monitor airborne particulate matter", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 51, 109-120.

Dutt G. y Ravindranath N. H., 1993, "Alternative bioenergy strategies for cooking", In: Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (Eds.), *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Island Press, Washington D.C.

Edwards R. D., y Smith K. R., 2002, "Carbon Balances, Global Warming Commitments, and Health Implications of Avoidable Emissions from Residential Energy Use in China: Evidence from an Emissions Database". http://www.giss.nasa.gov/meetings/pollution2002/d3_edwards.html, 8 April.

Edwards R. D., Smith K. R., Zhang J. F. y Ma Y. Q., 2004, "Implications of changes in household stoves and fuel use in China", *Energy Policy*, 32, 395–411.

Edwards R. D., 2006, "Emissions of air pollution and GHG from the household sector", Workshop held at SINCIERE Opening, November 22–23, Beijing, China.

Field C. B., Campbell J. E. y Lobell D. B., 2008, "Biomass energy: the scale of the potential resource", *Trends in Ecology and Evolution*, 23(2), 65-72, doi:10.1016/j.tree.2007.12.001.

IEA., 2012, International Energy Agency, Technology Roadmap, Bioenergy for Heat and Power, OECD/IEA, 2012, Paris.

IEA., 2016, World Energy Balances, IEA, 2016 Edition.

IPCC., 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change, "Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing", in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L., (eds.)), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Chapter 2 ("Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing"), Table 2.14.

ISO TC 285., 2015, "Clean cookstoves and clean cooking solutions - Harmonized laboratory protocols - Part 1: Standard test sequence for emissions and performance, safety and durability".

ISO IWA., 2012, International Workshop Agreement 11: 2012., Guidelines for Evaluating Cookstove Performance; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.

Jetter J. J. y Kariher P., 2009, "Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions", *Biomass Bioenergy*, 33, 294–305.

Jetter J, Zhao Y, Smith KR, Khan B, Yelverton T, DeCarlo P, et al. 2012. Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environ Sci Technol* 2012; 46: 10827–834.

Johnson M., Edwards R., Alatorre C. y Masera O., 2008, "In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households", *Atmos. Environ.*, 42, 1206–1222.

Johnson M., Rufus E., Ghilardi A., Berrueta V., Gillen D., Alatorre-Frenk C. y Masera O.R., 2009, "Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects", *Environmental Science & Technology*, 43 (7), 2456–2462.

Johnson M., Edwards R., Berrueta V. y Masera O., 2010, "New approaches to performance testing of improved cookstoves", *Environ. Sci. Technol.*, 44, 368–374.

Kumar M., Kumar S. y Tyagi S. K., 2013, "Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26(2013)265–285

Lask K., Booker K., Han T., Granderson J., Yang N., Ceballos C. y Gadgil A., 2015, "Performance comparison of charcoal cookstoves for Haiti: Laboratory testing with Water Boiling and Controlled Cooking Tests", *Energy Sustain. Dev.*, 26, 79–86.

Li C., Kang S., Chen P., Zhang Q. y Fang G. C., 2011, "Characterizations of particle-bound trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) within Tibetan tents of south Tibetan Plateau, China, *Environmental Science and Pollution Research*. online.

MacCarty N., Ogle D., Still D., Bond T. y Roden C., 2008a, "A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves", *Energy Sustainable Dev.*, 12, 5–14.

MacCarty N., Still D., Ogle D. y Drouin T., 2008b, "Assessing Cook Stove Performance: Field and Lab Studies of Three Rocket Stoves Comparing the Open Fire and Traditional Stoves in Tamil Nadu, India on Measures of Time to Cook, Fuel Use, Total Emissions, and Indoor Air Pollution", Aprovecho Research Center.

MacCarty N., Still D. y Ogle D., 2010, "Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance", *Energy Sustainable Dev.*, 14, 161–171.

McKendry P., 2002a. "Energy production from biomass (part 1): conversion technologies", *Bioresource Technology*, 83, 37–46.

McKendry P., 2002.b "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies", *Bioresource Technology*, 83, 47–54.

Martin W.J., Glass R.I., Balbus J.M. y Collins F.S., 2011, *Science*, 334, 180–1.

Masera O., 1995, "Socioeconomic and environmental implications of fuel wood use dynamics and fuel switching in rural Mexico", Berkeley, CA: University of California.

Masera, O., Navia, J., Arias, T., Riegelhaupt, E., 1997, "Proyecto: Dendroenergía para el Desarrollo Rural: Patrones de Consumo de Leña en Tres Micro-regiones de México" (in Spanish), Patzcuaro.

Masera O. R. y Navia J., 1998, "Fuel switching or multiple cooking fuels: understanding interfuel substitution patterns in rural Mexican households", *Biomass and Bioenergy*, 12(5), 347-361.

Masera O. R., Diaz R. y Berrueta V., 2005, "From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico", *Energy for Sustainable Development*, 9, 25-36.

Medina P., Berrueta V., Martínez M., Ruiz V., Edwards R. D. y Masera O., 2017 "Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests", *Development Engineering*, 2, 20-28.

Miranda M.A., 2015, "Impactos socio-ambientales del proceso de adopción de estufas eficientes de leña en el México Rural. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

Ndiema C.K.W., Mpendazoe F.M. y Williams A., 1998. "Emissions of pollutants from a biomass stove", *Energy Convers. Mgmt.*, 39 (13), 1357-1367.

PEMS 2012, "Instructions for Use of the Portable Emissions Monitoring System (PEMS)". Aprovecho Research Center.

Pennise D., Charron D., Wofchuck T., Rouse J. y Hunt A, 2010, "Evaluation of Manufactured Wood-Burning Stoves in Dadaab Refugee Camps, Kenya. Berkeley Air Monitoring Group.

<http://berkeleyair.com/publications/page/2/>

Roden C. A., Bond T. C., Conway S., Benjamin A., Pinel O., 2006, "Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves". *Environmental Science and Technology*, 40(21), 6750–6757.

Roden C. A., Bond T. C., Conway S., Pinel O., MacCarty N., Still D., 2009, "Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves". *Atmospheric Environment*, 43, 1170-1181.

Romieu I., Riojas-Rodríguez H., Marrón-Mares A.T., Schilman A., Perez-Padilla R. y Masera O., 2009, "Improved biomass stove intervention in rural Mexico: impact on the respiratory health of women", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 180, 649–656.

Roth C., 2014, "Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass. An introduction to concepts and applications of wood-gas burning technologies for cooking 2nd revised edition", Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

SENER., 2015, Sistema de Información Energética, SENER.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance_Nacional_de_Energia_a_2015.pdf

Serrano-Medrano M., Arias-Chalico T., Ghilardi A. y Masera O., 2014, "Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico", *Energy for Sustainable Development*, 19, 39-46.

Smith K. R., 1994, "Health, energy, and greenhouse-gas impacts of biomass combustion in household stoves", *Energy Sustainable Dev.*, 1 (4), 23–29.

Smith K. R., Uma R., Kishore V. V. N., Lata K., Joshi V., Zhang J., Rasmussen R. A. y Khalil M. A. K., 2000a, "Greenhouse Gases from Small-scale Combustion Devices in Developing Countries", EPA/600/R-00/052; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC.

Smith K.R., Uma R., Kishore V.V.N., Zhang J.F., Joshi V. y Khalil M.A.K., 2000b, "Greenhouse implications of household stoves: an analysis for India", *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 741–763.

Smith K. R., 2003, "Indoor air pollution and acute respiratory infections", *Indian Pediatr.*, 40(9), 815–9.

Smith K. R. y Mehta S., 2003, "The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates", *Int. J Hyg. Environ. Health.*, 206(4–5), 279–89.

Tsai S. M., Zhang J., Smith K. R., Ma Y., Rasmussen R. A. y Khalil M. A. K., 2003, "Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China", *Environ. Sci. Technol.*, 37, 2869–2877.

UNEP y CCAC., 2016, United Nations Environment Programme (UNEP) and Climate and Clean Air Coalition (CCAC). *Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean Improving air quality while contributing to climate change mitigation*. ISBN: 978-92-807-3549-9.

US EPA., 2017, United States Environmental Protection Agency.

<https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> (accesado Enero 2017).

WBT., 2013, Water Boiling Test Version 4.1.2. Disponible en: Partnership for Clean Indoor Air. http://www.pciaonline.org/files/WBT4.1.2_0_0.pdf (accesado Febrero 2013).

WHO., 2014, World Health Organization (WHO). Indoor air quality guidelines: household fuel combustion. Geneva: World Health Organization.

WHO., 2016, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/> (Accesado Enero 19, 2017).

Winter J.C.F., 2013, Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment Research & Evaluation*. 18(10), 1-12.

Yuntenwi E. A. T., MacCarty N., Still D. y Jürgen E., 2008, "Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves", 2008, *Energy Sustainable Dev.*, 12, 42–57.

Zhang J. y Smith K. R., 1999, "Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in China", *Environ. Sci. Technol.*, 33 (14), 2311–2320.

Zhang J., Smith K. R., Ma Y., Ye S., Jiang F., Qi W., Liu P., Khalil M. A. K., Rasmussen R. A. y Thorneloe S. A., 2000, "Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors", *Atmospheric Environment* 34, 4537–4549.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Se presenta el proceso físico-químico, las reacciones químicas involucradas, las etapas y temperaturas de la combustión de la biomasa.

A.1 Etapas del proceso de combustión de biomasa

Existen 4 etapas que describen el proceso de combustión de biomasa las cuales se describen a detalle en el estudio reportado por (Roth y col., 2014).

1) SECADO: Cuando la biomasa se calienta y se aproxima a 100°C, el exceso de humedad contenido en la biomasa cambia de estado de líquido a vapor de agua. El exceso de humedad se evapora en la atmósfera y la biomasa sólida queda seca.

2) PIRÓLISIS: A una temperatura superior a 300°C, la pirólisis de la biomasa comienza (ruptura mediante altas temperaturas). El incremento de temperaturas eventualmente ocasiona una conversión completa de la biomasa en vapores volátiles y un residuo sólido llamado carbón residual (el cual se compone principalmente de carbono puro). Los vapores contienen varios compuestos derivados del carbono conocidos como gases volátiles.

3) GASIFICACIÓN: Esta etapa se lleva a cabo en la fase sólida del combustible. Es el paso durante el cual el carbón residual sólido generado por la fase de pirólisis se convierte a ceniza. Aproximadamente a los 600°C los gases volátiles se queman en presencia de un agente de oxidación (oxígeno vía de aire primario).

El gas combustible contiene principalmente CO , H_2 , CH_4 , NH_i , HCN , NO_x y otros hidrocarburos.

4) **COMBUSTIÓN:** Esta fase se lleva a cabo cuando todo el combustible se encuentra en estado gaseoso a una T de 800°C o mayor (reacción gas-gas). Los gases combustibles creados en la etapa previa de gasificación reaccionan con el oxígeno, proporcionado vía aire secundario, para completar el proceso de combustión. Incrementando el flujo de aire (oxígeno disponible) en la superficie del sólido durante la combustión del carbón residual, aumentará la velocidad de reacción de combustión lo cual también optimiza la eficiencia de combustión. Las Figuras A1 y A2 resumen el proceso de combustión de biomasa donde se muestra la formación de cada una de las etapas con sus respectivas temperaturas.

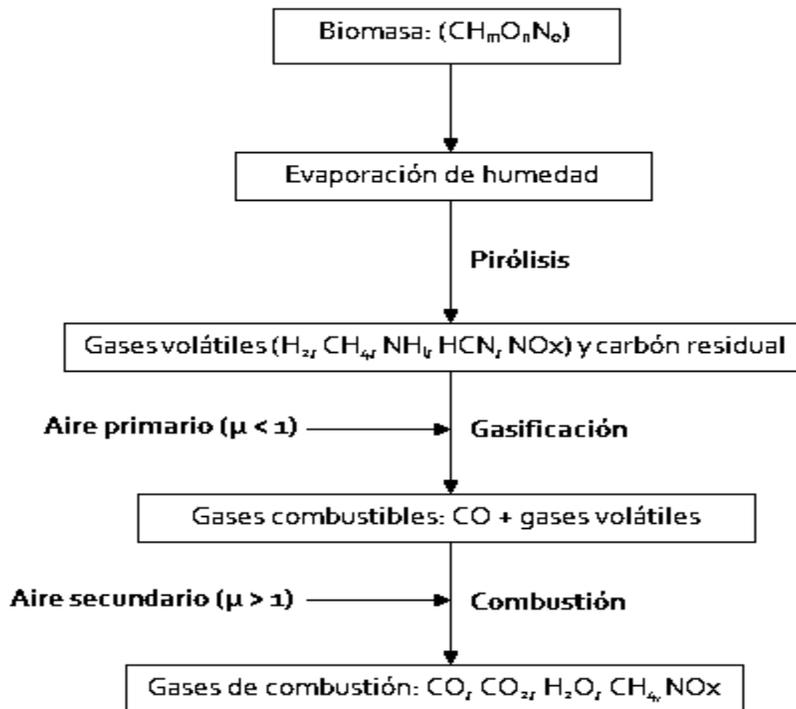


Figura A.1. Esquema que representa las etapas de la combustión de biomasa: Secado, Pirólisis, Gasificación y Combustión, (Tomado de Ndiema y col., 1998).

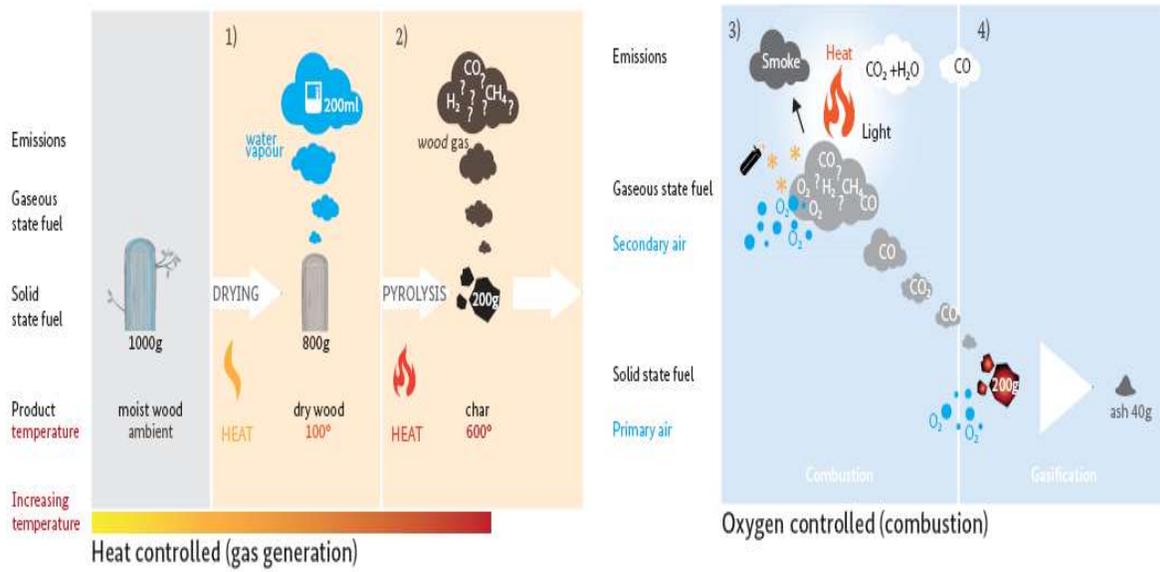


Figura A.2. Proceso de combustión de biomasa y temperaturas de formación de cada una de sus 4 etapas, (Tomado de Roth y col. 2014).

APÉNDICE B

En este Apéndice se hace una descripción completa de los protocolos WBT y CCT los cuales se utilizaron para analizar los parámetros de rendimiento y la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} de las IWS en relación al dispositivo tradicional.

Prueba de Ebullición de Agua (WBT)

El protocolo WBT es la prueba estándar de laboratorio a nivel mundial para evaluar el rendimiento energético y de emisiones tanto de las IWS como del dispositivo tradicional. La prueba consiste de tres fases las cuales determinan la capacidad de la estufa para:

1. Hervir 5 L de agua a partir de un inicio en frío en la estufa.
2. Hervir 5 L de agua a partir de un inicio caliente de la estufa (i.e. después de la 1ª fase).
3. Mantener el agua a una temperatura de 3°C por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos.

Antes de comenzar la prueba:

1. Recolectar el combustible suficiente con la finalidad de asegurarse de completar las pruebas WBT que se tengan previstas. Las estufas de gran masa térmica o materiales cerámicos pueden consumir una mayor cantidad de combustible. Para un set de pruebas de $n = 3$ se recomienda recolectar al menos 30 kg de combustible. Si se van a evaluar IWS de leña, el combustible debe presentar dimensiones similares y se debe evitar utilizar leña verde para las pruebas WBT.

2. Colocar 5 litros de agua en la olla de la prueba y llevarla al punto de ebullición. Se debe posicionar la sonda del termómetro en el centro de la olla de prueba, 5 cm por encima del fondo de la olla y registrar el punto de ebullición local en la hoja de datos.
3. Llevar a cabo las pruebas en un lugar completamente protegido del viento.
4. Registrar los resultados en la hoja de datos.

Equipo

- Escala de al menos 6 kg de capacidad y 1 gramo de exactitud.
- Plataforma resistente al calor para proteger la escala.
- Termómetro digital, preciso a 1/10 de grado.
- Reloj automático.
- Olla(s) de prueba.
- Accesorio de madera para mantener la sonda del termómetro en el agua.
- Pequeña pala/espátula para remover el carbón de la estufa.
- Tenazas para manejar el carbón.
- Recogedor para la transferencia del carbón.
- Bandeja de metal para mantener el carbón para pesarlo.
- Guantes resistentes al calor.
- 3 paquetes de combustible seco al aire. Uno para la cocción a fuego lento que pese aproximadamente 5 kilogramos. Los otros dos paquetes para el inicio en frío y caliente en ebullición, que pesen alrededor de 2 kilogramos cada uno.

Comenzando la prueba

- a. Registrar la temperatura del aire.
- b. Registre el peso de la olla comúnmente utilizada sin la tapa.
- c. Registre el peso del contenedor para carbón.
- d. Preparar 2 paquetes de madera los cuales pesen aproximadamente 2 kilogramos cada uno para las pruebas de inicio frío y caliente de alta potencia. Preparar 1 paquete de combustible de madera el cual pese aproximadamente 5 kilogramos para la prueba de cocción a fuego lento. Utilizar los palillos de madera aproximadamente del mismo tamaño para todas las pruebas. Registre las dimensiones aproximadas del combustible. Pesar y registrar en los espacios marcados en la hoja de datos adjunta. Identificar cada paquete y mantenerlos separados.

Fase de alta potencia (inicio frío):

1. Llenar cada olla con 5 L de agua limpia ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). Registre el peso de la olla(s) agregando el peso del agua.
2. Utilizando los accesorios de madera, colocar la sonda del termómetro en cada olla para que la temperatura del agua pueda ser medida en el centro, a 5 cm del fondo. Asegurarse de utilizar el termómetro digital y registrar las temperaturas del agua.
3. Registrar el peso de los materiales iniciales y siempre utilizar la misma cantidad y material.
4. Iniciar el fuego utilizando la madera del primer paquete de 2 kg.
5. Una vez que el fuego se ha encendido, inicie el temporizador y registre "0" cero. Si se está utilizando un reloj registre el tiempo de inicio. Trasladar rápidamente la primera olla a hervir evitando un excesivo uso de combustible.

6. Cuando el agua en la primera olla alcance la temperatura de ebullición local como se muestre en el termómetro digital, rápidamente seguir las siguientes instrucciones:
- Registre el tiempo en el cual el agua en la olla primaria (olla #1) alcanza el punto de ebullición local del agua. Registre la temperatura del agua para las otras ollas también.
 - Remover toda la madera de la estufa y apagar la llama. Golpear todo el carbón suelto de los extremos de la madera en la bandeja para pesar el carbón.
 - Pesar la madera sin quemar de la estufa con la madera sobrante del paquete previamente pesado y registrar el resultado.
 - Pesar cada olla con el agua incluida y registrar el peso.
 - Remover todo el carbón de la estufa y colocarlo con el carbón que fue golpeado de la madera y pesarlo. Registre el peso del carbón y del contenedor.
- Esto completa la fase de alta potencia (inicio frío). Continuar sin pausas a la parte de la prueba de fase alta potencia (inicio caliente) y no permitir que la estufa se enfríe.

Fase de alta potencia (inicio caliente)

- Rellenar la olla(s) con 5 L de agua fresca fría. Pesar la olla(s) (con agua incluida) y medir las temperaturas iniciales del agua. Registre ambas temperaturas.
- Inicie el fuego utilizando astillas (ocote) y madera del segundo paquete de 2 kg. Registre el peso de cualquier material inicial adicional.
- Registre el tiempo cuando el fuego comience y lleve la primera olla rápidamente a hervir evitando un excesivo uso de combustible.
- Registre el tiempo al cual la primera olla alcanza el punto de ebullición local y las temperaturas de ambas ollas.
- Después de alcanzada la temperatura de ebullición, rápidamente siga las siguientes instrucciones:

a. Remover toda la madera de la estufa y desprender cualquier carbón suelto dentro del contenedor de carbón. Pesar la madera removida de la estufa junto con la madera sin utilizar del segundo paquete. Registre el resultado.

b. Pesar cada olla con el agua incluida y registrar el peso.

6. Dejar el carbón en la estufa mientras rápidamente se continúa con la prueba de cocción a fuego lento.

Sin realizar pausas proceder directamente con la prueba de cocción a fuego lento.

Fase de baja potencia (cocción a fuego lento)

Esta fase está diseñada para probar la capacidad de la estufa para hervir a fuego lento utilizando tan poca madera como sea posible.

El agua hirviendo se reemplaza rápidamente en la estufa y el fuego se revive utilizando el carbón y madera fresca. Después el agua se hierve a fuego lento por un periodo de 45 minutos en aproximadamente 3°C debajo del punto de ebullición.

Iniciar la Prueba a Fuego Lento:

1. Registre el peso del paquete nuevo de combustible.
2. Mientras el agua se encuentra todavía cerca de la ebullición, pesar la olla (con el agua incluida). Registrar el peso y la temperatura.
3. Reavivar el fuego utilizando astillas (ocote) y madera del paquete previamente pesado. Registre el peso de cualquier material inicial adicional. Reemplace la olla en la estufa y registre el tiempo inicial cuando el fuego comience.

No existe problema si la temperatura de cocción a fuego lento varía hacia arriba o abajo, pero:

1. El evaluador debe tratar de mantener el agua hirviendo a fuego lento lo más cercano posible a 3°C por debajo del punto de ebullición local.
2. La prueba es inválida si la temperatura en la olla desciende más de 6°C por debajo de la temperatura de ebullición.
3. El evaluador no debe dividir la madera en pequeñas piezas a fin de reducir la potencia.

4. Registre el tiempo, por los siguientes 45 minutos mantener el fuego en un nivel que mantenga la temperatura del agua como sea posible 3°C por debajo del punto de ebullición local.

5. Después de 45 minutos rápidamente siga las siguientes instrucciones:

- a. Registre el tiempo final de la prueba (este debe ser de 45 minutos).
- b. Registre la temperatura del agua al final de la prueba.
- c. Remover toda la madera de la estufa y golpear cualquier carbón suelto de la madera dentro de bandeja de pesaje. Pesar la madera restante, incluyendo la madera que no se utilizó del paquete previamente pesado. Registre el peso de la madera.
- d. Pesar la olla con el agua sobrante y registrar el peso.
- e. Extraer todo el carbón sobrante de la estufa y pesarlo (incluyendo el carbón el cual fue golpeado de la madera). Registre el peso de la bandeja adicionando el peso del carbón.

Con esto se completa la Prueba de Agua en Ebullición. Se debe realizar la prueba completa al menos en 3 ocasiones para cada estufa para resultados precisos.

Prueba de Cocinado Controlado (CCT)

La prueba CCT se utiliza para evaluar el desempeño de las IWS utilizando técnicas de cocinado comunes o tradicionales (Kumar y col., 2013). La prueba CCT está diseñada para comparar el rendimiento de las IWS en relación al fogón tradicional controlando algunas variables tales como las características del combustible, las ollas para cocinar los alimentos y la cantidad de alimentos que se van a preparar.

Equipo

El equipo necesario para llevar a cabo una serie de pruebas CCT se discute a continuación.

- Combustible: Es necesaria una cantidad de combustible la cual sea suficiente en cantidad para realizar todas las pruebas CCT. Para ello, es necesario consultar con las cocineras la cantidad de leña que típicamente se utiliza por cada alimento que se vaya a cocinar. También se deben considerar las IWS que se van a evaluar así como el número de repeticiones que se consideren apropiadas.
- Alimentos y agua: Los evaluadores se deben asegurar de que cuentan con suficiente agua y alimentos para llevar a cabo todas las pruebas CCT para cada estufa con las n repeticiones consideradas.
- Olla(s) de cocción: Si es posible, se debe utilizar el mismo tipo de ollas (tamaño, forma y material) para probar cada estufa y cada alimento.
- Balanza: Por lo menos 6 kg de capacidad y precisión de ± 1 gramo.
- Plataforma resistente al calor para proteger la balanza cuando se pesa el carbón caliente.
- Medidor de humedad de la madera.

- Cronómetro.
- Termómetro (para el registro de la temperatura ambiente/temperatura de los alimentos no se registran en la CCT).
- Pala pequeña/espátula para remover el carbón de la estufa para el pesaje.
- Recogedor para la transferencia de carbón.
- Bandeja de metal para sostener el carbón para el pesaje.
- Guantes resistentes al calor.

Procedimiento

1. El primer paso para realizar la prueba CCT es consultar con la gente el propósito de la instalación de la estufa con la finalidad de elegir una tarea de cocina apropiada. Esta acción debe realizarse con suficiente tiempo de anticipación para asegurarse que se puede obtener la cantidad de alimentos necesaria para llevar a cabo todas las pruebas necesarias.

- Si la estufa está diseñada para su uso en el hogar, la tarea debe consistir en una comida típica la cual consiste en alimentos que se consumen con regularidad en la comunidad. Se pueden incluir uno o más platillos, aunque se deben evitar los alimentos que sean complicados de preparar por cuestiones de tiempo. Además del tipo de alimento, los probadores y los participantes de la comunidad también deben decidir sobre la cantidad de comida que es representativa de la comida de una familia típica. Esto es fundamental para asegurarse de que las pruebas son uniformes. Si se utilizan las medidas locales el probador debe convertirlas en medidas estándar y registrarlas en la forma de cálculo y datos.

- Si la estufa está diseñada para aplicaciones especiales, como por ejemplo hacer tortillas, entonces la tarea requiere menos insumos y los probadores deben decidir la cantidad exacta de alimentos que se van a utilizar durante la prueba.
- Una vez que se ha seleccionado la tarea de cocina, se debe asegurar que la cantidad de alimentos es suficiente para realizar las pruebas.

2. Después de seleccionar la tarea de cocina, el procedimiento debe ser descrito con el mayor detalle y registrarse de manera tal que sea entendible y claro tanto para los usuarios como para los probadores. Esto es importante para asegurar que la tarea de cocina se lleva a cabo de forma idéntica en cada estufa. Si es posible se puede incluir una medida que el probador considere objetiva cuando la comida esté "hecha". Después de que se ha obtenido suficiente cantidad de combustible y alimento y el procedimiento de la tarea de cocina está registrado y perfectamente clara para todos los participantes la prueba puede comenzar. La preparación de alimentos se debe realizar por una persona local la cual esté familiarizada con la comida que se ha preparado y con la estufa que está utilizando. Si la estufa es un nuevo diseño que difiere significativamente con el procedimiento tradicional de cocinado, es probable que se requiera algún tipo de entrenamiento antes de realizar la prueba. Al realizar una comparación de estufas con la prueba CCT, si se utiliza más de una cocinera, se debe probar cada estufa el mismo número de veces, con la finalidad de eliminar a la cocinera como una fuente potencial de sesgo en las pruebas. Además, para garantizar que los probadores tienen el control sobre el entorno de prueba, es recomendable que las pruebas se realicen en un ambiente controlado como un laboratorio.

3. Se debe registrar las condiciones locales como se indica en la forma de cálculo y datos.

4. Pesar los ingredientes predeterminados y hacer todas las preparaciones (lavado, pelado, corte, etc.). Para ahorrar tiempo, para alimentos no perecederos, la preparación se puede realizar a granel, por lo que todos los alimentos para todas las pruebas se pueden preparar a la vez.
5. Comenzar con un paquete pre-pesado de combustible que es aproximadamente el doble de la cantidad que las personas locales consideran necesario para completar la tarea de cocina. Registrar el peso en la hoja de datos.
6. Empezando con la estufa fría, dejar que la cocinera encienda el fuego de manera que lo hace regularmente. Inicie el cronómetro y registre el tiempo en la hoja de datos.
7. Mientras que la cocinera realiza la tarea de cocina, registrar las observaciones y comentarios relevantes que la cocinera hace (por ejemplo, las dificultades que encuentra, calor excesivo, el humo, inestabilidad de la estufa, etc.).
8. Una vez finalizada la tarea, registre la hora en la hoja de cálculo.
9. Retirar la olla(s) de la comida de la estufa y pesar cada olla con su comida en la balanza. Registrar el peso en gramos en la hoja de datos.
10. Retirar la madera quemada por el fuego y apagarlo de ser necesario. Eliminar el carbón en los extremos de la madera no quemada. Pesar la madera no quemada con la madera restante del paquete inicial. Colocar todo el carbón en la bandeja designada y pesarla. Se deben registrar las mediciones en la hoja de datos y cálculo.

11. La prueba está completa (recordar que cada estufa se debe probar por lo menos 3 veces).

La información presentada en este Apéndice pertenece a los autores de los Protocolos WBT (Versión 4.1.2) y CCT (Versión 2.0) y únicamente fue presentada en esta sección con fines ilustrativos. Las Referencias de ambos protocolos se pueden encontrar en la Bibliografía de este estudio.

APÉNDICE C

En este Apéndice se explica el procedimiento de elaboración de cada una de las tareas de cocinado individual evaluadas durante las pruebas CCT de este trabajo de tesis.

3 kg de tortillas. Ingredientes: 3 kg de masa para tortillas. *Procedimiento:* El procedimiento comienza cuando se hierve el maíz para posteriormente molerlo y obtener la masa para las tortillas las cuales tradicionalmente se elaboran con ayuda de un metate, dispositivo de piedras con superficie semi-plana, agregando un poco de agua. *Freír 5 piezas de huevo. Ingredientes:* 5 piezas de huevo, aceite para cocinar y sal. *Procedimiento:* Primero, sobre una cacerola se calienta el aceite durante 5 minutos y posteriormente se cocinan los huevos agregando la sal que la cocinera considere. *Hervir 1 kg de frijoles. Ingredientes:* 1 kg de frijoles crudos, 6 L de agua y sal. *Procedimiento:* Los frijoles se cocieron en una olla de aluminio con una base de 26 cm de diámetro y un volumen de 8 L. La cocinera agregó agua cuando lo consideró necesario y el cocimiento terminó cuando la textura de los frijoles fue la adecuada. *Sopa de arroz. Ingredientes:* ½ kg de arroz, ½ L de agua y una mezcla de jitomates, cebolla y ajo. *Procedimiento:* Primero, el arroz se fríe en una cacerola durante 10 minutos en alta potencia. Después la cocinera agrega la mezcla y el agua. Posteriormente, toda la mezcla comienza a hervir y la potencia de cocción se reduce para mantener la ebullición. La sopa de arroz se cocina después de ~1 hora. *Freír ½ kg de frijoles. Ingredientes:* ½ kg de frijoles cocidos, sal y aceite para cocinar. *Procedimiento:* El aceite para cocinar se calienta en una cacerola alrededor de 15 minutos con una potencia alta. Después los frijoles cocidos y la sal se mezclan con el aceite caliente. El tiempo de cocinado depende de la cocinera pero usualmente demoran 30 minutos para estar cocinados.

Hervir 1 L de agua. Ingredientes: 1 L de agua. Procedimiento: El agua se coloca sobre un recipiente de aluminio de 17 cm de diámetro y culmina cuando se alcanza el punto de ebullición.

En la Figura C1 se muestra la secuencia de cocinado simultánea realizada durante el CBC en la estufa Patsari y en ambos dispositivos tradicionales. Mientras que en la Figura C2 se observan secuencias de cocinado de diferentes hogares de la localidad.



Figura C1. Secuencia de cocción simultánea realizada en el CBC para: (A) estufa Patsari, (B) TSF y (C) U-type.



Figura C2. Secuencias de cocinado observadas en hogares rurales de la región rural de Michoacán, México.

APÉNDICE D

En el siguiente Apéndice se muestran los resultados del análisis estadístico realizado mediante la distribución t-student para los parámetros de rendimiento y la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5} de las IWS respecto al fogón tradicional durante las pruebas WBT y CCT y en el CBC.

Los intervalos de confianza (CI, por sus siglas en inglés) los cuales representan un rango de valores dentro de los cuales hay una probabilidad del 95% que se encuentre la media de la población (ISO., 2015) y los cuales se han utilizado en estudios previos (Adkins y col., 2010).

Tabla D1. Porcentajes de reducción promedio e intervalos de confianza del 95% para las IWS de plancha respecto al TSF.

Parámetro	Fase	Patsari		Patsari Portátil		Mera-Mera		Ecostufa		ONIL	
		%	CI	%	CI	%	CI	%	CI	%	CI
gCO	Alta potencia	28	17 ± 22	30	18 ± 21	26	15 ± 22	63	37 ± 21	67	40 ± 27
	Baja potencia	50	17 ± 15	47	16 ± 14	47	16 ± 15	67	22 ± 13	58	19 ± 15
gPM _{2.5}	Alta potencia	52	2.8 ± 2.0	44	2.3 ± 2.0	35	1.8 ± 2.1	45	2.4 ± 2.1	42	2.3 ± 2.1
	Baja potencia	59	2.6 ± 1.2	57	2.5 ± 1.3	51	2.2 ± 1.2	49	2.1 ± 1.3	63	2.8 ± 1.3
g(c)CO/kg(c)CO ₂	Alta potencia	62	51 ± 30	57	46 ± 30	51	41 ± 30	77	63 ± 29	84	68 ± 29
	Baja potencia	71	37 ± 29	71	37 ± 29	66	35 ± 29	79	41 ± 29	67	35 ± 31

Nota: La columna “%” significa la reducción porcentual respecto al TSF.

Las reducciones fueron estimadas como: [(emisión (TSF) – emisión (IWS))/emisión (TSF)]*100% como lo reportó (Adkins y col. 2010) y los CI del 95% fueron calculados utilizando: $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{1-\alpha/2} S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$,

where $S_p^2 = \frac{S_1^2(n_1-1) + S_2^2(n_2-1)}{n_1+n_2-2}$, $t_{1-\alpha/2}$ se obtiene de tablas, and \bar{X}_1 se consideró como la media del TSF.

Tabla D2. Análisis estadístico utilizando la distribución t para evaluar el rendimiento de la estufa Patsari mediante diferentes niveles de comparación.

Tarea	Comparación	N	DWC (g)		Tiempo de cocinado		gCO		gPM2.5	
			%	valor p	%	valor p	%	valor p	%	valor p
Tortillas	Patsari vs U-type	6	30	< 0.01***	-12	0.13	48	0.01***	43	0.01***
Freír 5 huevos		6	50	< 0.01***	10	0.62	63	0.02**	61	0.08*
Hervir frijoles		3	-9	0.34	-17	0.15	33	0.02**	55	0.07*
Sopa de arroz		3	40	0.07*	7	0.65	48	0.09*	58	0.08*
Freír frijoles		3	8	0.67	-25	0.23	18	0.66	4	0.42
Hervir agua		3	16	0.22	-20	0.06*	25	0.23	28	0.21
CBC		5	35	< 0.01***	-6	0.52	65	< 0.01***	66	0.01***
CBC	Patsari vs TSF	5	40	< 0.01***	-5	0.58	77	< 0.01***	74	0.01***
CBC vs Suma de tareas	Patsari vs Patsari	-	38	< 0.01***	41	< 0.01***	29	0.01***	44	< 0.01***
WBT	Patsari vs TSF	5	-48	< 0.01***	-35	< 0.01***	32	0.09*	54	< 0.01***

Nota: La columna "%" se refiere al porcentaje de reducción de la estufa Patsari mediante diferentes comparaciones. Los valores p fueron obtenidos utilizando los niveles de significancia *** $\alpha = 0.01$, ** $\alpha = 0.05$ and * $\alpha = 0.10$.

APÉNDICE E

En este Apéndice se describen los dos Artículos de Investigación que surgieron tras concluir este trabajo de tesis.

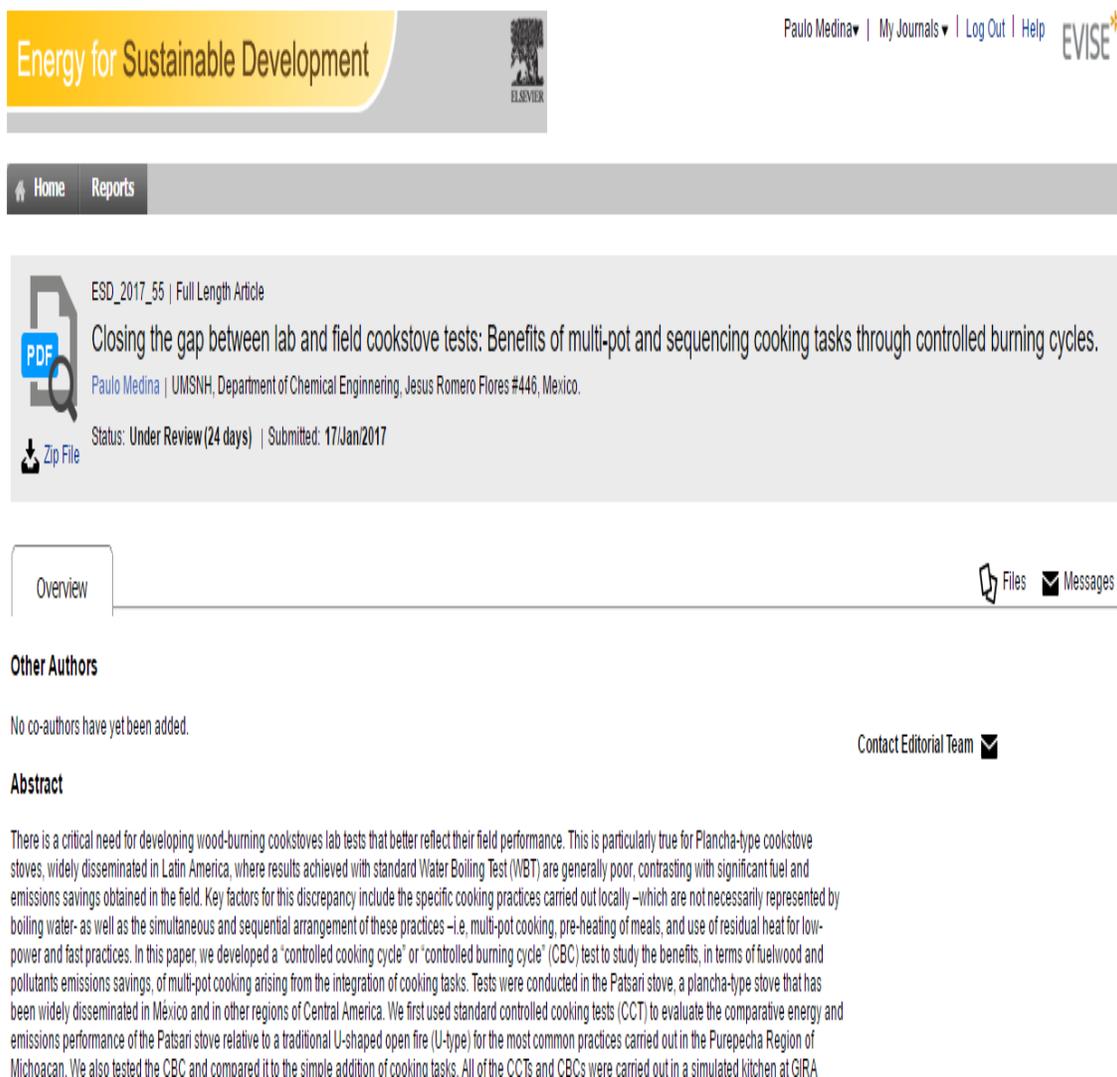
El primero de ellos se encuentra publicado en la Revista Development Engineering bajo el título: "Comparative performance of five Mexican plancha type cookstoves using Water Boiling Tests" en el año de 2017, volumen 2, páginas 20-28. La Figura E1 muestra el Manuscrito publicado así como la referencia para su búsqueda en línea.



Figura E1. Artículo publicado en la Revista Development Engineering.

<https://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>

El segundo titulado “Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles” se encuentra actualmente en revisión en la Revista Energy for Sustainable Development. La Figura E2 muestra el estatus del Manuscrito.



The screenshot displays the journal's interface. At the top, the journal title "Energy for Sustainable Development" is shown in a yellow banner, alongside the Elsevier logo and user navigation links for "Paulo Medina", "My Journals", "Log Out", and "Help". Below this is a navigation bar with "Home" and "Reports" tabs. The main content area features a manuscript card for "Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles" by Paulo Medina. The card includes a PDF icon, a status of "Under Review (24 days)", and a submission date of "17/Jan/2017". Below the card is an "Overview" tab and a "Files" section with a "Messages" icon. The "Other Authors" section states "No co-authors have yet been added." and a "Contact Editorial Team" link is visible. The "Abstract" section contains the following text:

There is a critical need for developing wood-burning cookstoves lab tests that better reflect their field performance. This is particularly true for Plancha-type cookstove stoves, widely disseminated in Latin America, where results achieved with standard Water Boiling Test (WBT) are generally poor, contrasting with significant fuel and emissions savings obtained in the field. Key factors for this discrepancy include the specific cooking practices carried out locally –which are not necessarily represented by boiling water– as well as the simultaneous and sequential arrangement of these practices –i.e. multi-pot cooking, pre-heating of meals, and use of residual heat for low-power and fast practices. In this paper, we developed a “controlled cooking cycle” or “controlled burning cycle” (CBC) test to study the benefits, in terms of fuelwood and pollutants emissions savings, of multi-pot cooking arising from the integration of cooking tasks. Tests were conducted in the Patsari stove, a plancha-type stove that has been widely disseminated in México and in other regions of Central America. We first used standard controlled cooking tests (CCT) to evaluate the comparative energy and emissions performance of the Patsari stove relative to a traditional U-shaped open fire (U-type) for the most common practices carried out in the Purepecha Region of Michoacan. We also tested the CBC and compared it to the simple addition of cooking tasks. All of the CCTs and CBCs were carried out in a simulated kitchen at GIRA

Figura E2. Artículo en revisión en la Revista Energy for Sustainable Development.