



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE EMISIONES DE CARBONO
NEGRO, CARBONO ELEMENTAL Y CARBONO ORGÁNICO
PROVENIENTES DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE
COCCIÓN CON LEÑA, EN CICLOS DE COCINADO”**

TESIS presentada por:

MINERVA LÓPEZ OROZCO

A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener
el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

Asesor:

Dr. Marco Antonio Martínez Cinco

Co-asesor:

Dr. Víctor Manuel Ruíz García

Morelia, Michoacán

Agosto 2018



Asunto: Aprobación de Impresión de Tesis

Oficio número 306/2018.

Lic. Ulises Gutiérrez Vazquez
Jefe del Departamento de Titulación de la
U.M.S.N.H.
Presente.-

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "EVALUACIÓN COMPARATIVA DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO, CARBONO ELEMENTAL Y CARBONO ORGÁNICO PROVENIENTES DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE COCCIÓN CON LEÑA, EN CICLOS DE COCINADO" después de haber revisado el manuscrito que presentó el Ingeniero Minerva López Orozco, con matrícula 0213241K concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de tesis.

Por lo anterior este Comité Tutorial da el aval para su impresión final.

Presidente o Asesor: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco 02001403

Coasesor: Víctor Manuel Ruiz García 917089

Vocales:

Dr. Rafael Maya Yescas 0400204-0

MC. Gabriel Martínez Herrera 83030689

Dr. Omar Raúl Masera Cerutti 96002395

Atentamente.
Morelia, Michoacán a 27 de junio de 2018.

Dr. José Ma. Ponce Ortega
Coordinador de la Maestría en Ciencias en
Ingeniería Química

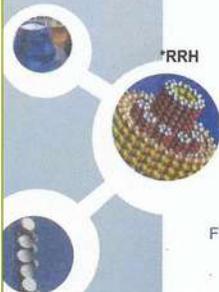


DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería Química / Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Francisco J. Mújica S/N / Col. Felicitas del Río / C.P. 58030 / Morelia, Michoacán / Tel. y Fax: 443. 327 3584 Ext. 1211
<http://posgrado.fiq.umich.mx/>



RESUMEN

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO, CARBONO ELEMENTAL Y CARBONO ORGÁNICO PROVENIENTES DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE COCCIÓN CON LEÑA EN CICLOS DE COCINADO

Por

Minerva López Orozco

Agosto 2018

Maestra en Ciencias en Ingeniería Química

El carbono negro es considerado como la segunda emisión humana más importante en términos del calentamiento global, además de ser asociado con la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar debido a su exposición en partículas respirables. No hay mucha información disponible de emisiones domiciliarias por cocinado con biomasa, particularmente en el territorio mexicano. Se midieron las emisiones totales de tres estufas mejoradas y el tradicional Fogón "U", con la prueba del ciclo de cocinado (CBC), analizando el carbono mediante dos técnicas: óptica (transmisor óptico SootScan) para carbono negro y termo-óptica (Analizador de carbono CM-150) para carbono elemental y orgánico. Encontrándose diferencia significativa entre los factores de emisión de Carbono Elemental de la estufa ONIL (0.03 ± 0.01 gC/Kg) y el Fogón "U" (0.30 ± 0.13 gC/Kg), los factores de emisión de Carbono Orgánico y Carbono Negro de los diferentes dispositivos no presentaron diferencias significativas, según la prueba de Tukey con 95% de confianza. La contribución al calentamiento global de las emisiones del Fogón "U" es 20% más que la obtenida para la estufa PATSARI.

PALABRAS CLAVES: Estufa, Leña, Mejorada, Potencial y Calentamiento.

Dirigida por: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y Dr. Víctor Manuel Ruíz García

ABSTRAC

COMPARATIVE EVALUATION OF EMISSIONS OF BLACK CARBON, ELEMENTARY CARBON AND ORGANIC CARBON FROM THE MAIN COOKING DEVICES WITH WOOD IN COOKING CYCLES

For

Minerva López Orozco

August 2018

Master in Chemical Engineering

Black carbon is considered the second most important human emission in terms of global warming, in addition to being associated with cardiopulmonary morbidity and mortality due to its exposure to respirable particles. There is not much information available on household emissions from cooking with biomass, particularly in Mexican territory. The total emissions of three improved stoves and the traditional Fogón "U", with the cooking cycle test (CBC), were measured. Analyzing carbon by means of two techniques: optical (SootScan optical transmitter) for black carbon and thermo-optical (CM-150 carbon analyzer) for elemental and organic carbon.

Finding a significant difference between the Elemental Carbon emission factors of the ONIL stove (0.03 ± 0.01 gC/Kg) and the Fogón "U" (0.30 ± 0.13 gC/Kg), The emission factors of Organic Carbon and Black Carbon of the different devices did not show significant differences, according to the Tukey test with 95% confidence. The contribution to global warming of the "U" Fogon emissions is 20% more than that obtained for the PATSARI stove.

Directed by: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco and Dr. Víctor Manuel Ruíz García

DEDICATORIA

A Fernanda y Diego Ferrán

Ustedes son mi mejor trabajo, sepan que la obtención de un grado no es el objetivo final, es sólo el fin de un ciclo y el comienzo de una nueva aventura. Deseo que tengan tantas aventuras como sus sueños se los permitan.

ÍNDICE

Resumen	iii
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Nomenclatura	xii
Agradecimientos	xiv
Glosario	xvi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Justificación	5
1.4 Hipótesis	6
Capítulo 2. Marco Teórico	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 La energía en México	9
2.2.1 Bioenergía	11
2.3 Material particulado	15
2.4 Carbono negro y carbono elemental	17
2.5 Carbono orgánico	19
Capítulo 3. Metodología	21
3.1 Tipos de estufas	21
3.2 Equipos de medición	23

3.2.1 Sistema portátil de medición de emisiones	23
3.2.2 Analizador de gases	23
3.2.3 Medidor de velocidad	23
3.2.4 Bomba universal	24
3.2.5 Calibrador de flujo	24
3.2.6 Higrómetro	24
3.2.7 Desionizador	24
3.2.8 Balanzas	24
3.2.9 Transmisor óptico	25
3.2.10 Analizador de carbono total	25
3.3 Prueba del ciclo de cocinado (BCT)	25
3.4 Toma de muestras	29
3.4.1 Sistema gravimétrico	30
3.5 Medición de Carbono	30
3.5.1 Método óptico	30
3.5.2 Método termo-óptico	32
3.6 Procesamiento de datos	34
3.7 Factores de emisión	36
3.8 Materia orgánica	37
3.9 Contribución de los productos de combustión en el calentamiento global	37
Capítulo 4. Resultados	39
4.1 Diseño de trenes de muestreo	39
4.2 Resultado de pruebas	42

4.3 Contribución de los productos de combustión en el efecto invernadero.	59
Conclusiones	63
Bibliografía	65
Anexo	72
Anexo A Construcción de cabaña simulada	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial de calentamiento global.	19
Tabla 2: Energía y tiempo de cocinado de algunos alimentos típicos de la región Purhépecha.	28
Tabla 3. Balance de carbono, consumo de leña y tiempo de cocinado por dispositivo en prueba CBC	42
Tabla 4. Masa promedio de carbono orgánico OC, carbono elemental EC (medidos ambos con Transmitancia Óptica Térmica) y carbono negro CN (medido con Transmisómetro) en ciclos de cocinado CBC.	45
Tabla 5. Masa de Materia orgánica estimada por dispositivo en CBC (Ciclo de cocinado controlado)	48
Tabla 6. Factores de emisión de CO, CO ₂ y PM _{2.5} (expresados como gramos de Carbono por kilogramo de leña seca consumida)	50
Tabla 7. Factores de emisión de OC, EC, CN,OM (expresados como gramos de Carbono por kilogramo de leña seca consumida)	54
Tabla 8. Efecto neto de contribución al calentamiento y entre dispositivos.	59
Tabla 9. Contribución al efecto invernadero por dispositivo y contaminante	59

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1: Porcentaje de energía consumida en México en 2016. SENER 2017	12
Figura 2: Sinopsis de las interacciones entre los aerosoles y la radiación solar y su impacto en el clima [IPCC 2014]	16
Figura 3: Fogón “U”	22
Figura 4: Funcionamiento del medidor de carbono CM-150	33
Figura 5: Tren de muestreo, vista superior	39
Figura 6: Tren de muestreo chimenea e intramuros	40
Figura 7: Tren de chimenea	41
Figura 8: Estimación de los coeficientes de la regresión lineal de la velocidad contra la caída de presión (pvalor=0.000)	41
Figura 9: Diagrama de caja de leña consumida en promedio por dispositivo para prueba CBC	43
Figura 10: Resultado de la prueba de Tukey para el consumo de leña consumida, con 95% de intervalo de confianza.	43
Figura 11: Diagrama de caja de tiempo de cocinado	44
Figura 12: Resultado de la prueba de Tukey para promedio de tiempo de cocinado, con 95% de intervalo de confianza.	44
Figura 13: Comparación de masa de Carbono Total por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.	46
Figura 14: Comparación de masa de Carbono Orgánico por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.	46
Figura 15: Comparación de masa de Carbono Elemental por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación	47

estándar.

Figura 16: Comparación de masa de Carbono Negro por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.	47
Figura 17: Comparación de factor de emisión de CO, expresado como gramos de Carbono contenido en el CO por kilogramo de leña consumida, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan desviación estándar	49
Figura 18: Diagrama de caja de factor de emisión de CO	50
Figura 19: Resultado de la prueba de Tukey para el factor de emisión de CO, con 95% de intervalo de confianza.	50
Figura 20: Comparación de factor de emisión de CO ₂ , expresado como gramos de Carbono contenido en el CO ₂ por kilogramo de leña consumida, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan desviación estándar	51
Figura 21: Diagrama de caja de factor de emisión de CO ₂	51
Figura 22: Resultado de la prueba de Tukey para el factor de emisión de CO ₂ , con 95% de intervalo de confianza.	52
Figura 23: Comparación de factor de emisión de PM _{2.5} , expresado como gramos de Carbono contenido en el PM _{2.5} por kilogramo de leña consumida, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan desviación estándar	52
Figura 24: Diagrama de caja de factor de emisión de PM _{2.5}	53
Figura 25: Resultado de la prueba de Tukey para el factor de emisión de Material Particulado 2.5, con 95% de intervalo de confianza.	55
Figura 26: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Orgánico	55
Figura 27: Resultado de prueba de Tukey para Factor de Emisión de Carbono Orgánico, con 95% de intervalo de confianza.	55
Figura 28: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Elemental	56

Figura 29: Resultado de prueba de Tukey para Factor de Emisión de Carbono Elemental, con 95% de intervalo de confianza.	56
Figura 30: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Negro	57
Figura 31: Resultado de la prueba de Tukey para Factor de Emisión de Carbono Negro, con 95% de intervalo de confianza.	57
Figura 32: Diagrama de caja de la relación Carbono Elemental entre Carbono Total	58
Figura 33: Contribución efecto invernadero por dispositivo y contaminante.	60
Figura 34: Comparación de la contribución de CO ₂ al efecto invernadero por dispositivo	60
Figura 35: Comparación de la contribución de CO al efecto invernadero, por dispositivo	61
Figura 36: Comparación de la contribución de Materia Orgánica al efecto invernadero, por dispositivo.	61
Figura 37: Comparación de la contribución del Carbono Elemental al efecto invernadero, por dispositivo.	62

NOMENCLATURA

BNE: Balance Nacional de Energía

CCA: Comisión para la Cooperación Ambiental

CBC: Ciclo de Cocinado Controlado (*Control Burning Cycle*)

CH₄ Metano

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Bióxido de Carbono

CN: Carbono Negro

DE: Desviación estándar

EC: Carbono elemental (*Elemental Carbon*)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GWP: Potencial global de calentamiento (*Global Warming Potencial*)

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

IRENA: Agencia Internacional de Energías Renovables (*International Renewable Energy Agency*)

LAERFTE: Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y la Transición Energética

OC: Carbono orgánico (*Organic Carbon*)

OM: Materia orgánica (*Organic matter*)

NMHC: Hidrocarburos no metánicos

N₂O: Óxido Nitroso

NO_x: Óxidos de nitrógeno

PIB: Producto Interno Bruto

PIC: Producto de la combustión incompleta

PM_{2.5}: Material particulado menor a 2.5µm

REMBIO: Red Mexicana de Bioenergía

SENER: Secretaría de Energía

TEC: Carbono elemental total (*Total elemental carbon*)

TOC: Carbono orgánico total (*Total organic carbon*)

WGC: Contribución al Calentamiento Global (*Warming Global Contribution*)

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Agradezco en primer lugar a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), así como a la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química y su planta docente, por la oportunidad de realizar los estudios de Licenciatura y Maestría, respectivamente. De igual forma a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por el espacio de trabajo que me proporcionaron, especialmente a la Unidad de Ecotecnologías, el Laboratorio de Bioenergía y al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) que me facilitaron equipos de medición, insumos, recursos humanos e infraestructura.

Agradezco al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA) por el apoyo con infraestructura, recursos humanos y herramientas. Así mismo al Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER-CONACYT 2014-246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica, Secretaría de Energía, por la maquinaria, equipos y los recursos económicos brindados para la culminación de este trabajo de tesis.

Agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, por su tiempo, apoyo y enseñanzas. A mi Co-asesor Dr. Víctor Manuel Ruíz García por su dedicación, su asertiva manera de corregirme, sus enseñanzas y disposición. Al Dr. Omar Masera Cerutti por asesorar y enfocar las piezas medulares de éste trabajo de investigación. A los miembros del comité tutorial, el Dr. Rafael Maya Yescas y el M.C. Gabriel Martínez Herrera por sus valiosos comentarios y aportaciones para la mejora continua de éste trabajo durante los tutorales de avance de tesis.

Agradezco al personal del IIES: de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones a la Ing. Atzimba López Maldonado, el M.I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada; del Laboratorio de Bioenergía, a el M.C René D. Martínez Bravo y de la Unidad de Ecotecnologías a el M.C. Alfredo Fuentes Gutiérrez, por su apoyo en facilitar vehículos, herramientas e insumos de papelería.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Agradezco a la Dra. Candela de la Sota Sáñez, al Dr. James Jetter, al Dr Rufus D. Edwards, al Dr. Andrew Grieshop y al Ing Enrique Riegelhaupt quienes fueron muy generosos compartiéndome sus conocimientos, los cuales sirvieron profusamente para el desarrollo de éste proyecto.

Agradezco al personal de GIRA, a el Dr Víctor Berrueta Soriano, a Evaristo Herrera Medina, Gil y Félix Patricio Chávez, que colaboraron en los trabajos en campo y a la sra. María del Carmen Guerra Ramos, que fue parte importante de las pruebas, ya que fungió como cocinera.

De igual manera agradezco a la Lic Vanessa Salazar Solis, a Marcela Vanegas, a Enrique Tapia Rodríguez, a el Dr. Paulo César Medina Herrera, la M.C Saraí Ramos Vargas, el M.C. Juan Carlos Vázquez Tinoco, y a el Ing Dante Samuel Villanueva Peralta, que además de su apoyo técnico e intelectual me brindaron un agradable ambiente de trabajo y su sincera amistad.

Finalmente agradezco al M.C. Fernando Damián Barajas Godoy, por ser mi compañero de vida, de sueños y metas, quién junto con Fernanda y Diego Ferrán, me han acompañado en este proceso con paciencia, comprensión, brindándome su apoyo con mucho amor, gracias.

GLOSARIO

Aerosol: Un coloide de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas. El tamaño puede ser de $0.002\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$, mayor que una molécula, pero lo suficientemente pequeña para permanecer en el aire.

Albedo: Porcentaje de radiación que una superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella.

Morbilidad: Es el número de personas que enferman en una población y periodo determinado.

Mortalidad: Es el número de defunciones en una población y periodo determinado.

Potencial de calentamiento: Define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de un kilogramo de un gas de efecto invernadero.

Capítulo 1. Introducción

Los combustibles de biomasa como la leña son una fuente potencial de las energías renovables. Aproximadamente el 10 % de la demanda energética global se suministra por la madera y más de 3 mil millones de personas queman diario alguna forma de bio-combustible para obtener energía [-L'Orange,2012]. Se calcula que, sólo en México, entre 22 y 25 millones de personas utilizan madera para cocinar o como calefacción, principalmente en zonas rurales de los estados de Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán. Estimaciones muestran que la leña supuso 34 por ciento del abasto de energía para consumo doméstico en el país en 2009, cifra que se ha mantenido relativamente constante en los últimos años. Los combustibles que se consumen con fines domésticos comprenden: petróleo, carbón, gas licuado de petróleo (gas LP), queroseno, gas natural y madera [CCA , 2015]. Entre los aparatos de combustión que normalmente se utilizan en casa figuran: calentadores de poca capacidad, calefactores, estufas, chimeneas —incluidas las empotradas—, braseros de leña para calefacción y estufas de leña y de madera granulada (pellet). Las estufas de leña pueden dividirse aún más en función del tipo de tecnología; por ejemplo: convencionales, certificadas, avanzadas y de eficiencia energética. Aunque la adopción de estufas más limpias y eficientes aumenta gradualmente, los fogones abiertos tradicionales y menos eficientes siguen predominando. Según estudios recientes, resulta particularmente difícil encontrar información sobre el consumo de leña en México, porque la mayor parte de la madera se adquiere y consume al margen del mercado formal. Además, hay una enorme variabilidad en cuanto al consumo entre una región y otra del país (es decir, la diversidad vegetal, factor que determina la disponibilidad de leña, cambia en función de la situación geográfica y las condiciones meteorológicas), además de que es cada vez mayor el número de hogares rurales que recurre a una combinación de combustibles (esto es, gas LP y madera), al disponerse de gas LP en más regiones. Asimismo, actualmente es imposible diferenciar entre el uso de los distintos combustibles: si se utilizan como calefacción o para cocinar [CCA , 2015]. A pesar de la importancia de las

emisiones de cocina intramuros, calidad del aire local y global, especialmente en países en desarrollo, aún no son bien comprendidas dichas emisiones. Mientras numerosos estudios han medido emisiones gaseosas y algunas emisiones de partículas, no está claro si estas emisiones son representativas de estufas actualmente en uso. Muchos de estos estudios usan pruebas estandarizadas en lugar de simular condiciones mundiales reales [Smith y col., 1993,2000; Zhang et al., 2000; Bhattacharya y col.,2002].

Del aerosol producto de la combustión, el material carbonoso es el principal componente con un diámetro aerodinámico menor de 2.5 micrómetros, siendo relacionado con el impacto en la salud, la visibilidad y el clima. La fracción carbonosa del material particulado consiste en carbono elemental (EC) y una variedad de compuestos orgánicos. El carbono elemental tiene una estructura similar al grafito impuro y es emitido directamente a la atmósfera por combustión. El carbono orgánico (OC) puede ser emitido (OC primario) o formado "in situ" (OC secundario) [Seinfeld,1998].

A menudo el EC es referido como carbono negro (CN); sin embargo, existe una diferencia entre el EC y CN: el método de medición; las propiedades ópticas del EC son muy importantes, tanto es así que algunos métodos para su cuantificación se basa en estas propiedades.[Afonso, 2004], para el presente estudio el EC es el que se cuantificó con el método termo-óptico y el CN con el transmisómetro. El carbono orgánico, por otro lado, absorbe poco en la región visible, y consiste en una variedad de hidrocarburos, normalmente incoloro.

El carbono elemental se calienta fuertemente en la atmósfera, el carbono orgánico y la materia orgánica (OM) tienen un efecto contrario. [MacCarty et al 2008-b]. Se estima que el carbono negro es la segunda emisión humana más importante en términos de cambio climático atmosférico en el presente; sólo el dióxido de carbono es considerado con mayor fuerza [Jacobson 2001, Bond 2013, Zanatta 2016]. La Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) en su reporte de 2012 concluye que los estudios epidemiológicos proveen suficiente evidencia para asociar la morbilidad y

mortalidad cardiopulmonar con la exposición a carbono negro. Más del 40% de las emisiones de CN se producen por la quema de biomasa, donde África y Asia son los mayores contribuyentes [Bond et al., 2007].

En los últimos años internacionalmente ha cobrado gran interés la determinación del contenido de carbono (orgánico, elemental y total) en las fracciones PM10 y PM2.5, realizadas mediante métodos basados en el principio termo-óptico, como representativa del contenido de diversos compuestos resultantes de la combustión incompleta de hidrocarburos [Molina et al,2015]. Además de una mejor evaluación de las emisiones gaseosas, existe una necesidad crítica de mejorar las estimaciones de las emisiones de aerosoles debido a los respectivos efectos de calentamiento y enfriamiento de las fracciones elementales y orgánicas. [Johnson 2008].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Realizar una evaluación comparativa de los factores de emisiones de carbono negro, elemental y orgánico, provenientes de la combustión de leña en los principales dispositivos de cocción usados en el país, con el ciclo de cocinado.

1.2.2 Objetivos particulares.

1. Identificar los dispositivos de mayor distribución en México.
2. Diseñar y construir los trenes de muestreo de material particulado para emisiones de chimenea e intramuros.
3. Realizar experimentación en la cabaña simulada de GIRA, en la región Purhépecha de Michoacán.
4. Determinar factores de emisión en los diferentes dispositivos de cocción.
5. Realizar análisis estadísticos para encontrar diferencias significativas entre parámetros y dispositivos.

1.3 Justificación

En 2016, los recursos energéticos de México mostraron un agotamiento en las energías fósiles disponibles, haciendo más notoria la inminente necesidad de una transición energética global hacia combustibles limpios, pues el país requiere llevar a cabo un compromiso a nivel internacional para frenar el cambio climático, por lo que los dispositivos mejorados cobran importancia, apareciendo continuamente nuevas estufas de cocción de alimentos, por lo que se requiere una evaluación técnica de dichos dispositivos y que se desarrolle una normatividad para asegurar sean los modelos de estufas más limpias y eficientes las que sean difundidas y usadas por la población. El gobierno es el principal proveedor de dichas estufas, por lo que es de suma importancia que conozca los inventarios de emisiones y que dichos inventarios se mantengan actualizados. Para establecer los parámetros de la norma se requiere conocer las emisiones de los dispositivos actuales, principalmente emisiones de aerosol. Con la presente investigación se obtendrán estándares mínimos para nutrir dicha norma.

También hay acciones nacionales para la mitigación del cambio climático a corto y mediano plazo, México tiene el compromiso de reducir un 50% el CO_{2e} para 2050 y no se conocen inventarios de emisiones en materia de aerosoles con potenciales de calentamiento. Dado que en México no se cuenta con inventario de emisiones de carbono negro, carbono elemental y carbono orgánico para estufas de leña, basados en mediciones en el país con la prueba de ciclo de cocinado, con el presente trabajo se pretende contribuir en la creación de dicho inventario, ya que con esta información disponible se puede apoyar a el gobierno federal en sus metas de mitigación al 2050.

1.4 Hipótesis

Existen diferencias significativas en los factores de emisión de EC y OC entre las principales estufas usadas en México comparados con el Fogón “U”, el cual aporta más CO_{2e} y tiene una contribución mayor en el efecto invernadero.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Antecedentes

Desde los inicios de la civilización se ha usado la biomasa para cocinar, por medio de el uso de fogones. Siendo el hollín el contaminante arquetípico a lo largo de la historia, su presencia en la atmósfera fue descubierto en las décadas de 1970 y 1980, a la par que el tema de las estufas de leña cobró mayor fuerza con el auge del movimiento de tecnología apropiada en la década de los setenta y principios de los ochenta, y tenía como objetivo fundamental promover alternativas para reducir el impacto del uso de la leña en la deforestación. Así surgió el concepto de “estufa de leña” con los siguientes calificativos: “mejorada”, “ahorradora” o “eficiente”. Los primeros estudios sobre el carbono negro en el medio ambiente se resumieron en el libro *Black Carbon in the Environment* de E. D. Goldberg (1985), sus temas incluyen propiedades químicas y físicas, formación, distribución, degradación, fuentes antropogénicas, transporte y reacciones en el ambiente. Planteando la idea del carbono negro (CN) como una sustancia altamente refractaria que permanece después de la quema de biomasa y sugiriendo que tenía una vida ambiental extremadamente larga. Las mediciones realizadas en los años 1980 y 1990 siguieron el dogma de que el CN era altamente refractario. En el 2001 Schmidt y colaboradores midieron CN en ocho muestras de suelo por seis métodos establecidos; todos los métodos llegaban al CN eliminando los demás compuestos por calor, medios químicos o una combinación de ambos, encontrando discrepancias aparentes, presentes en toda la amplitud de las técnicas analíticas usadas para el análisis de CN, con concentraciones naturales de CN que varían más de un factor de 500 para la misma muestra medida a través de diferentes métodos. Estas discrepancias son una función de: (1) la falta de una definición común de carbono negro; (2) falla en la detección de material que comúnmente se entiende que es derivado del fuego a través de algunos métodos; y (3) la sobredetección potencial de CN por algunos métodos, que es la detección de material no derivado de la combustión. Más tarde en su artículo, Masiello (2004) presenta el diseño que muchos

investigadores de carbono negro usan para entender el papel de CN en el ciclo del carbono, discutiendo el modelo de combustión continua de CN y el continuo metodológico que implica este modelo. En años recientes la atención científica se ha desplazado del papel del carbono negro como contaminante a su importancia como motor del calentamiento global [Ramanathan et al., 2005]. Algunos cálculos de modelos sugieren que los efectos en el clima producto del CN pueden competir con los del metano, y que el calentamiento global actual debido al carbono negro puede ser tanto como 0.3-0.4 °C [Chung y Seinfeld, 2005], mientras otros [Jones et al., 2005] estiman un menor efecto en el clima, consecuentemente existe una controversia sobre los beneficios de reducir el CN como estrategia para mitigar el calentamiento global [Jacobson, 2002] porque los efectos climáticos del aerosol CN dependen fuertemente de sus propiedades físico-químicas, así como su tiempo de residencia y distribución en la atmósfera [Jacobson, 2001]. Una comprensión profunda de estas propiedades y técnicas exactas para la determinación de CN en la atmósfera se considera esencial [Andreae, 2006]. Es hasta el inicio del nuevo siglo cuando toma un renovado impulso el tema de las estufas de leña en lo gubernamental, ahora con el tema de la salud como eje central, y con el nuevo agregado del tema ambiental global, específicamente respecto a las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero); como documentan García-Frapolli y colaboradores (2010) al realizar una evaluación económica comprensiva de la diseminación del programa de estufas mejoradas en las comunidades rurales de México.

Recientemente el CN está entre los compuestos con un alto potencial de calentamiento como lo explica Bond y colaboradores (2013) al proveer una evaluación del carbono negro y el cambio climático, que es integral en su inclusión de todos los procesos conocidos y relevantes, y es cuantitativa para proveer mejores estimaciones e incertidumbres de los principales términos de forzamiento: absorción solar directa, influencia en fase mixta, líquido, y las nubes de hielo, y la deposición de nieve y hielo. Aunque aún se desconoce el efecto neto que produce la contribución del OC.

2.2 La energía en México

México es un país dependiente de los combustibles fósiles, cuya producción y oferta energéticas siguen estando cubiertas mayoritariamente por el gas y el petróleo. El más reciente balance energético reporta que los hidrocarburos aportaron 87.2 % de la producción de energía primaria en 2015, en la cual el petróleo representó 61.3 %, el gas natural 24.6 % y el carbón mineral aportó 3.4 % (SENER 2016). El hecho de que se siga privilegiando la explotación, quema y uso de combustibles fósiles no solo retrasa la transición energética en México, sino que implica que se continúen acumulando impactos negativos en la atmósfera, el clima y la economía del país, ya que los procesos productivos generan costos ambientales derivados del agotamiento de los recursos naturales y de la degradación del medio ambiente. En este sentido, en 2015, estos costos registraron un monto de 907,473 millones de pesos, que representaron el 5 % del PIB a precios de mercado. Lo anterior refleja los gastos en los que tendría que incurrir la sociedad para prevenir o remediar la disminución y pérdida de recursos naturales, así como el deterioro del medio ambiente [Fundar, 2017]. La contaminación atmosférica representó el mayor costo ambiental en 2015, al ubicarse en 577,698 millones de pesos, le siguieron los costos por degradación del suelo 88,402 millones, agotamiento de hidrocarburos con 79,175 millones, residuos sólidos 61,253 millones, la contaminación del agua 57,403 millones, agotamiento del agua subterránea 27,883 millones, y por último los costos del agotamiento de recursos forestales con 15,658 millones de pesos” (INEGI, 2016, pp.5-6).

México debe afrontar de manera simultánea dos temas prioritarios: la creciente demanda energética y el cambio climático, cuyas metas deben ser integrales, para lo cual es preciso concentrar esfuerzos en el desarrollo de energías renovables y no apostar por la continua dependencia de un modelo energético basado en fuentes fósiles, en la lógica de que es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Si bien se ha incrementado la participación de las energías renovables en el sector energético, ésta no ha sido suficiente, pues en 2008 se dieron

los primeros pasos para la diversificación de la matriz energética con la participación de fuentes renovables de energía, a partir de la promulgación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y la Transición Energética (LAERFTE), no se lograron resultados satisfactorios debido a las ventajas fiscales, técnicas y de políticas concedidas a los hidrocarburos (Declaratoria de Sociedad Civil, 2014). La Reforma Energética de 2013 continúa con esta tendencia al priorizar la extracción de hidrocarburos en el acceso y uso del territorio y otros recursos naturales, por encima de consideraciones de derechos humanos, ambientales y climáticas; cuando, por el contrario, las leyes y políticas públicas deben encaminarse a ofrecer condiciones que aceleren la participación de las energías renovables, por ejemplo, a través de políticas y leyes, objetivos y metas claras en materia de energía renovable, acceso a financiamiento, subastas e incentivos fiscales [IRENA, 2015]. Aprovechar el abundante potencial de los recursos renovables permitiría reducir de forma sustancial la dependencia de las fuentes fósiles, alcanzar las metas comprometidas en materia de reducción de emisiones nacionales e internacionales, generar una transición energética sólida y eficiente que satisfaga la creciente demanda del sector [Anglés y col, 2017].

Diversos estudios muestran que los beneficios de apostarle a las energías renovables no son solo climáticos, sino también económicos, los cuales son notables. De acuerdo con los análisis de la Agencia Internacional de Energías Renovables (2016) (IRENA, por sus siglas e inglés), si las energías renovables alcanzan 36 % de la participación de la matriz energética global para el 2030, el Producto Interno Bruto (PIB) global se podría incrementar 1.1 %, es decir, aproximadamente 1.3 billones de dólares. Asimismo, se reporta que la mejora en el bienestar humano iría más allá de este crecimiento del PIB, gracias a los beneficios sociales y ambientales que un despliegue de energías renovables significaría. Por ejemplo, los empleos en el sector se podrían incrementar de los 9.2 millones de trabajos en la actualidad, a más de 24 millones para el 2030 [Fundar, 2017]

2.2.1 Bioenergía

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa. La biomasa es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Ésta se puede clasificar en tradicional y moderna, la primera incluye madera, carbón vegetal, residuos agrícolas y estiércol, para calentar y cocinar; la segunda la conforman pellets y briquetas hechas de madera o residuos agrícolas, así como combustibles líquidos bajos en emisiones, con lo que es posible obtener un uso más eficiente de la energía. Los biocombustibles son los obtenidos a partir de la biomasa y pueden ser o no, transformados o procesados. El caso de la bioenergía es particularmente interesante ya que su aplicación va desde la cocción de alimentos hasta la industria o como combustibles para aviones. La biomasa es una fuente de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar transformada en los procesos fotosintéticos, la cual se libera al romperse los enlaces de los compuestos orgánicos durante el proceso de combustión, emitiendo bióxido de carbono y agua. La manera en que el combustible es cosechado influye en el potencial de cambio climático cuando se cocina con biomasa, si la biomasa se cosecha de forma sostenible el CO₂ liberado durante la combustión teóricamente es reabsorbido por la biomasa que crece para reemplazarla [MacCarty 2008-b]. A nivel internacional, la bioenergía representa el 10% del consumo total de energía y 77% de las energías renovables. Se estima que para el año 2035 podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo, y constituir así uno de los pilares de la transición a fuentes renovables de energía [REMBIO,2011]. Según la Secretaría de Energía (SENER), el consumo de energía primaria en México llegó a 9,140.194 PJ en 2016. La fuente principal de energía fue el petróleo, seguido de la electricidad y gas natural (Figura 1). Las energías renovables en México tienen una participación del 5.7%, en donde la leña representa el 4.7%, el bagazo de caña el 0.7% y la energía solar alcanza el 0.2% [SENER, 2017]

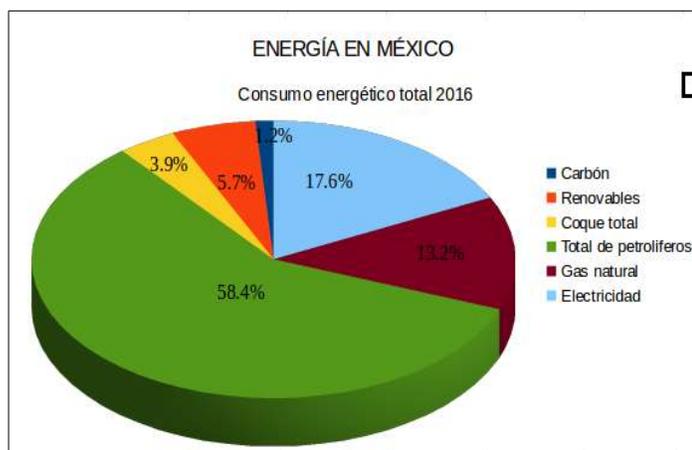


Figura 1: Porcentaje de energía consumida en México en 2016. SENER 2017

Históricamente, se observa una participación relativa decreciente de la biomasa en el consumo nacional de energía, aunque en términos absolutos el consumo de los bioenergéticos (leña, carbón vegetal y bagazo) permanece más o menos constante. Un estudio reciente señala que el consumo de leña indicado en el Balance Nacional de Energía (BNE) está subestimado debido a dos factores: a) la leña requerida para la producción de carbón vegetal no se contabiliza y b) el consumo real de leña sería un 35% mayor al indicado por el BNE en 2008, para llegar a un total de 334 PJ/a [Masera y col., 2010].

La leña es consumida por alrededor de 28 millones de personas en el medio rural, principalmente para la cocción de alimentos y también para pequeñas industrias como tabiqueras, mezcaleras, panaderías y tortillerías.[REMBIO, 2011] Ante la problemática asociada al uso tradicional de la leña, desde hace algunas décadas se han desarrollado varias alternativas como las estufas de leña, estudios recientes han demostrado que las estufas de leña son tecnologías que producen beneficios tangibles tanto para la salud como para la economía familiar y el ambiente, por lo que en un análisis costo-beneficio integral son una opción con una alta rentabilidad. En el caso particular de México, la

ejecución de un programa de estufas de leña beneficiaría a una cuarta parte de la población: alrededor de 28 millones de habitantes o casi 6 millones de familias. Se ha documentado que esta nueva generación de estufas de biomasa reduce significativamente el consumo de combustible, además de disminuir la emisión de gases de corta duración, lo cual significa una considerable mitigación de las emisiones de GEI.

A nivel mundial se postula que por razones ambientales, sociales y económicas es necesaria una transición energética, entendida como un proceso de cambio en los modelos de producción y utilización de energía, hacia sistemas más equitativos, mejor distribuidos geográficamente, y menos contaminantes. La transición energética implica cambios radicales: se necesitan grandes esfuerzos para aumentar la eficiencia de uso final, lograr ahorros de energía primaria, desarrollar un portafolio amplio de sustitutos a los combustibles fósiles con las correspondientes tecnologías de producción y uso final, así como impulsar la descentralización de los sistemas energéticos.

Las fuentes de energía renovables se han reconocido como algunas de las alternativas más prometedoras para superar los problemas del presente sistema energético basado en combustibles fósiles. Entre ellas están la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la bioenergía, que en su conjunto pueden tener un rol importante en la transición energética, tanto por su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como por ser aplicables a una gran diversidad de usos finales. En particular, la biomasa puede procesarse para obtener biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos renovables y de bajas emisiones que pueden reemplazar a los combustibles fósiles.

En la combustión perfecta, las emisiones de combustión serían sólo dióxido de carbono y agua. Si la biomasa se quema por completo, y el combustible se cosecha de manera sostenible, cocinar con biomasa podría ser una situación de carbono neutral. Desafortunadamente, la mayor parte de la quema de biomasa también produce muchos productos de combustión incompleta (PICs), que tienen un mayor impacto en el clima

que el CO_2 , además del carbono negro, como son:

Monóxido de carbono (CO), es uno de los principales productos de la combustión incompleta. Las emisiones de CO en las estufas no mejoradas de leña son frecuentemente de hasta 10-15% de las emisiones de CO_2 , y esta cifra es aún mayor para el carbón mineral. El CO tiene un potencial de calentamiento global (GWP) de 1.9 veces mayor que el CO_2 [IPCC, 2007] y es un gran contribuyente de la contaminación atmosférica localizada en áreas urbanas.

Metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero (GEI) relativamente potente. Tiene un GWP a 100 años 28 veces más que la misma masa de CO_2 y una vida atmosférica de aproximadamente 12 años. Es parte de los Acuerdos de Kyoto y se considera uno de los gases de efecto invernadero más importantes que resultan de la quema de biomasa.

Hidrocarburos no metánicos (NMHC). Los hidrocarburos son sustancias que consisten principalmente en hidrógeno y carbono. Las emisiones de hidrocarburos no quemados indican una combustión incompleta y los vapores pueden ser nocivos si se inhalan. El GWP a cien años es aproximadamente 12 veces mayor que el de CO_2 . El forzamiento climático ocurre debido a la contribución de los NMHC a la formación del ozono [Edwards y Smith, 2002]

Óxido nitroso (N_2O). Un poderoso GEI tiene una vida atmosférica de 120 años y un GWP a cien años de 298 años. También forma parte de los Acuerdos de Kyoto primarios y uno de los principales gases considerados en los inventarios de quema de biomasa. [IPCC, 2007]

Óxidos de nitrógeno (NO_x) es un término para los diversos óxidos de nitrógeno, distinto del N_2O , producidos durante la combustión cuando las temperaturas de combustión alcanzan un nivel lo suficientemente alto como para quemar parte del nitrógeno en el aire. NO_x es un precursor del ozono y cuando se disuelve en la humedad atmosférica puede provocar lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno afectan la química atmosférica de formas complejas, incluyendo las interacciones con los radicales OH y contribuyendo en

la química del ozono. En la actualidad se cree que son neutrales en el efecto invernadero [Bond, 2007] , y como tal el IPCC no presenta un GWP para NO_x [IPCC, 2007]

2.3 Material particulado

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Por su origen, las partículas pueden definirse como primarias (aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante) o secundarias (las que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre gases y partículas primarias).

Las partículas pueden tener un origen natural y también antropogénico. De acuerdo con su diámetro aerodinámico, éstas pueden clasificarse en menores o iguales a 10 micras (PM₁₀), en menores o iguales a 2.5 micras (PM_{2.5}) y menores o iguales a 0.1 micras (PM_{0.1}). El tamaño es un parámetro importante para caracterizar su comportamiento en la atmósfera y por ende, la concentración a la que puede estar expuesta la población; también determina la capacidad de penetración y retención en diversas regiones de las vías respiratorias. Los efectos de la inhalación de partículas han sido ampliamente estudiados en humanos y animales. Incluyen asma, enfermedades cardiovasculares y muerte prematura.

Los aerosoles influyen en el clima de muchas maneras. En primer lugar, dispersan y absorben la luz solar, modificando así el balance radiativo de la Tierra (véase figura 2). En general, la dispersión que provocan hace que el planeta sea más reflectante y contribuye a enfriar el clima, mientras que la absorción tiene el efecto contrario y contribuye a calentarlo, si las partículas tienen un albedo de dispersión individual (SSA) bajo absorben más luz solar y crean más calentamiento en la atmósfera. El equilibrio entre el enfriamiento y el calentamiento depende de las propiedades de los aerosoles y de las condiciones medioambientales, generalmente las partículas que tienen bajo SSA tienen una proporción más alta de EC a OC en su composición. Según Ramanathan y colaboradores [2001] la absorción de la radiación solar por aerosoles causa el

calentamiento de la troposfera inferior, lo cual puede conducir a una estabilidad vertical alterada, con implicaciones para el ciclo hidrológico. Muchos estudios observacionales han cuantificado los efectos radiativos locales de los aerosoles antropógenos y naturales, pero, para determinar su impacto global, hacen falta datos y modelos satelitales. Una de las incertidumbres que siguen existiendo se deriva del carbono negro, que absorbe radiación solar que no solo es más difícil de medir que aquellos que la dispersan, sino que también ocasiona una respuesta complicada de las nubes [IPCC 2014]. Los impactos locales y regionales de los aerosoles, incluidas las reducciones de visibilidad y los patrones climáticos alterados, pueden ser sustancialmente mayores que los impactos globales [Ramanathan y col., 2005,2007].

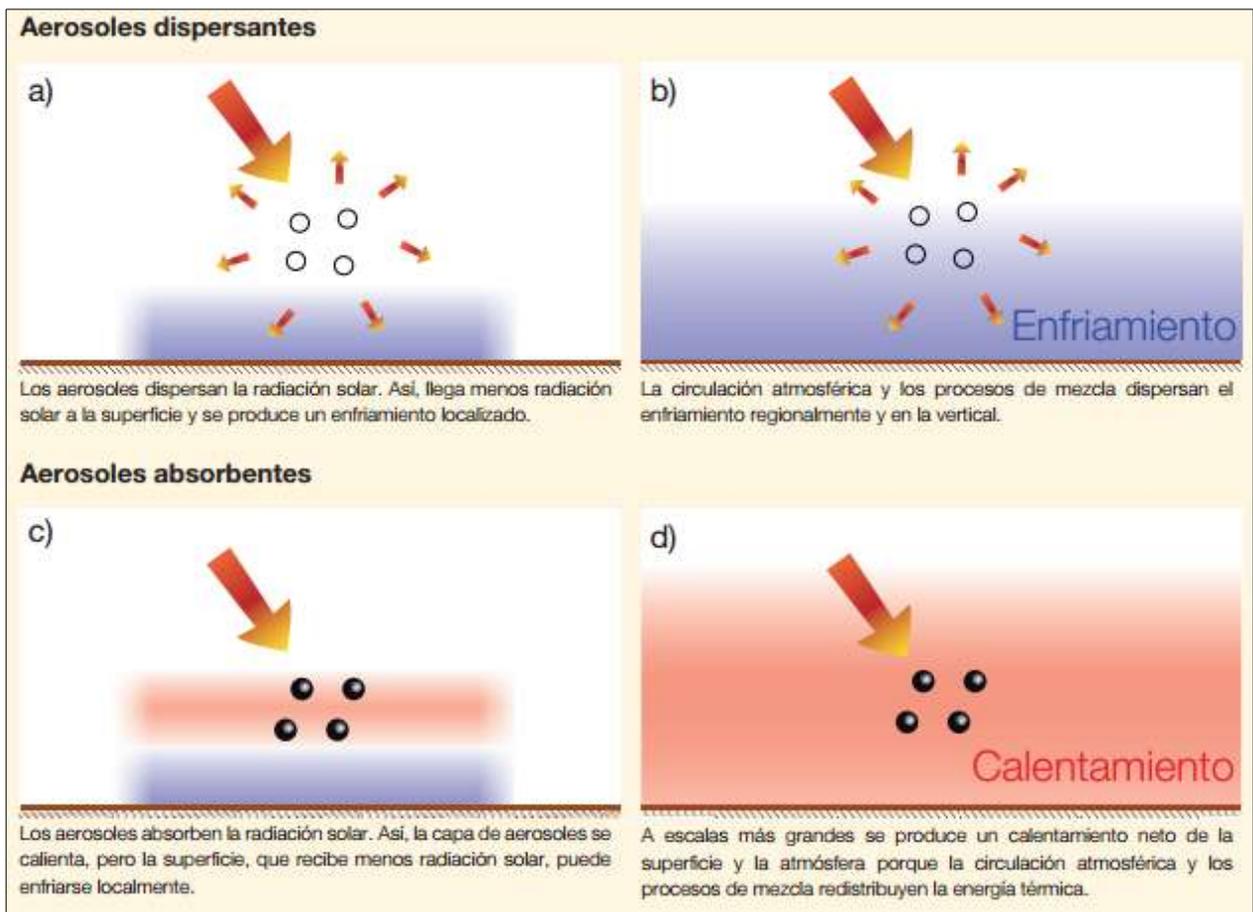


Figura 2: Sinopsis de las interacciones entre los aerosoles y la radiación solar y su impacto en el clima [IPCC 2014]

Aunque no forma parte del acuerdo de Kioto, los efectos forzadores del clima de las partículas emitidas por la combustión de la biomasa son bastante importantes [MacCarty 2008-b].

2.4 Carbono negro y carbono elemental

El carbono negro es una especie de aerosol definida a efectos prácticos en términos de absorción de luz, de reactividad química y/o de estabilidad térmica. A veces se conoce como hollín. Está formado principalmente por la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa, aunque también se da de forma natural. Permanece en la atmósfera únicamente unos días o semanas. Es el componente de las partículas en suspensión (PM) con mayor capacidad de absorción de luz y tiene un efecto de calentamiento por absorber calor en la atmósfera y reducir el albedo cuando se encuentra depositado en el hielo o la nieve [IPCC, 2014].

El carbono elemental no es volátil en condiciones ambientales, y absorbe fuertemente en la región visible, así como cerca de infrarrojos y ultravioleta y a menudo es referido como carbono negro (CN); sin embargo, existe una diferencia entre el EC y CN: la definición de carbono negro tiene más aplicabilidad en los procesos atmosféricos que implica la interacción con la radiación, mientras que la definición de carbono elemental es más apropiado para describir las características de reactividad físicas y químicas de las partículas carbonosas. Cuando se deposita en el hielo o la nieve que cubre grandes extensiones del planeta, modifica la estructura cristalina de estas superficies que normalmente reflejan el calor del sol, y en cambio, acelera su derretimiento. [Bond et al, 2013].

Este aerosol es un tipo de material carbonoso con la combinación de las siguientes propiedades físicas:

- 1.-Absorbe fuertemente la luz visible con una sección transversal de absorción de masa de al menos $5 \text{ m}^2/\text{g}$ a una longitud de onda de 550 nm .

- 2.-Es muy refractario, esto es, que conserva su forma básica a muy altas temperaturas , con una temperatura de vaporización cerca de 4000K .
- 3.-Es insoluble en agua, en solventes orgánicos incluyendo metanol y acetona,y en otros componentes del aerosol atmosférico, y
- 4.-Existe como un agregado de pequeñas esferas de carbón .

La revisión de los estudios toxicológicos por parte de la organización mundial de la salud sugieren que quizá el carbono negro no sea directamente el mayor componente tóxico del material particulado fino ($PM_{2.5}$), pero puede operar como un portador de una extensa variedad de químicos de toxicidad variable hacia el cuerpo humano. [WHO, 2012].

En México la mayoría de los estudios apuntan a que el mayor impacto en la salud por partículas, lo originan compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como el carbono elemental [NOM-025-SSA1-2014].

La ventaja del carbono negro frente a otros contaminantes es que el periodo de permanencia en la atmósfera es corto: la remoción atmosférica ocurre de unos pocos días a semanas, vía precipitación y contacto con superficies . Por lo que si se reducen sus emisiones, el impacto que esto tendrá sobre el calentamiento global se podrá observar a más corto plazo, y la disminución de la temperatura será más rápida de lo que se conseguiría con una reducción similar de las emisiones de metano o CO_2 . Representando una potencial estrategia de mitigación que puede reducir el clima global [Bond et al, 2013]. Según las estimaciones de Jacobson [2007], el carbono negro es responsable de un 16 % del calentamiento global, solo por detrás del CO_2 . Las estimaciones realizadas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU en su Cuarto informe de evaluación [2007] parecen corroborar esta hipótesis.

El potencial de calentamiento global (GWP) para el Carbono Negro, Carbono Orgánico, Metano y Monóxido de Carbono según el IPCC 2013 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Potencial de calentamiento global.

Emisión	Potencial de calentamiento global en relación con el CO ₂	
	Periodo de 20 años	Periodo de 100 años
CO	5.9	2
Metano	84	28
Carbono Orgánico	-240	-69
Carbono Negro	2421	680

Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Chapter 8

Las mediciones ópticas de CN sufren una serie de problemas: (1) muchos de los instrumentos usados actualmente introducen un sesgo sustancial en la determinación de la absorción de luz de aerosol, (2) no hay un factor de conversión único entre la absorción de luz y EC o CN en aerosoles ambientales, y (3) la diferencia de propiedades espectrales entre los diferentes tipos de materia carbonosa absorbente de la luz, así como la complejidad química de carbono marrón, llevan a varias complicaciones tanto conceptuales como prácticas. [Andreae et al 2006].

2.5 Carbono orgánico (OC)

Este término tiene una simplificación excesiva, porque el carbono orgánico puede contener cientos o miles de compuestos orgánicos diferentes con variaciones en su comportamiento atmosférico [Bond et al, 2004]. Aquí OC es la cantidad que resulta del análisis termo-óptico. El carbono orgánico generalmente se produce en fuegos humeantes, consiste principalmente en partículas dispersas que pueden ser de color blanco a marrón claro. OC contribuye al enfriamiento global, ya que se compone de partículas de aerosol, que reflejan la luz solar hacia el espacio. Los contaminantes también se pueden convertir en núcleos de condensación, los cuales reflejan mayormente la luz solar hacia el espacio, pero las nubes también atrapan el calor irradiado por la tierra, por lo que los efectos de las nubes son complejos. En los aerosoles, el carbono orgánico no existe en forma aislada, sino que está unido al

oxígeno e hidrógeno. Juntos los compuestos orgánicos reciben el nombre de materia orgánica (OM) [MacCarty 2008-b].

La relación típica OM/OC es 1.5 a 2.1, pero puede variar ampliamente. Se estimó el GWP de la OM como -75 veces el del CO₂ (es decir, un enfriamiento de 75 veces mayor que el CO₂) [Bond et al,2004].

Capítulo 3. Metodología

3.1 Tipos de estufas

Se eligieron los siguientes dispositivos por su distribución: estufa PATSARI, estufa ONIL, estufa ECOSTUFA y Fogón “U”; en el artículo de Medina [2016] se muestra la imagen de las estufas mencionadas. De la estufa Patsari se han distribuido aproximadamente 200,000 unidades en varios estados como Michoacán, Oaxaca, Sinaloa y otros. La distribución de la ONIL ha sido de 90,000 unidades predominantemente en Guerrero, Oaxaca, San Luis Potosí, y Chiapas. La distribución de la estufa Ecostufa no se sabe con precisión, pero varios miles se han distribuido en varios estados. Se estima que el total de estufas instaladas en campo es de más de 450 000 unidades [Medina, 2016].

PATSARI

La estufa Patsari es de construcción en el sitio. Cuenta con una entrada para leña, una cámara de combustión y dos hornillas secundarias, está formado su exterior a base de ladrillo rojo y el interior con la mezcla de barro, arena y cemento. Utiliza un comal metálico en la cámara de combustión de 54 cm de diámetro y dos comales de metal de 2mm de espesor, en las hornillas de 27 cm, que se sellan para evitar la fuga o escape de calor y humo.

El calentamiento de las hornillas secundarias se realiza mediante túneles, los cuales conducen los gases de combustión hacia dichas hornillas. Las hornillas secundarias cuentan con baffles o deflectores que mejoran la transferencia de calor de los gases hacia el comal. Estas hornillas están diseñadas para tareas de menor demanda energética tales como mantener calientes los alimentos previamente preparados o calentar agua.

ECOSTUFA

La estufa ahorradora de leña ECOSTUFA está fabricada en masa, con piezas interconectables hechas de acero galvanizado, tiene una cámara de combustión de 18.5 x 14 cm, el comal es de acero en lamina negra de 40 x 60.5 cm y 3mm de espesor.

ONIL

La estufa ONIL es una estufa de leña que se construye en masa, utiliza el principio de combustión Rocket, se fabrica con concreto armado, cuenta con una cámara de combustión de barro cocido de 12 x 11 cm y material aislante de piedra pómez, el comal es de placa de hierro de 34 x 70.5 cm y 3mm de espesor, además tiene dos anillos metálicos que son removibles para una mejor transferencia de calor, la chimenea es de tubos galvanizados, su peso es de 106 kg aproximadamente.

FOGÓN TIPO “U”

Es un diseño de estufas tradicionales el cual se construye en diversas regiones de México con barro o arcilla [Berrueta et al, 2008] tiene forma de U o herradura, y a pesar de tener muy poca eficiencia térmica de entre 5 y 7% es muy usado ya que tiene varias ventajas: es económico o no tiene ningún costo, fácil de construir, fácil de usar y controlar, fácil de cambiar de lugar, se puede usar con varios combustibles, se adapta a las formas de los recipientes [GIRA, 2003]. La combustión de la biomasa se da de manera incompleta e incontrolada.



Figura 3: Fogón “U” con comal

3.2 Equipos de medición

3.2.1 Analizador de gases

Sistema portátil de medición de emisiones (PEMS)

Se desarrolló por el Centro de Investigaciones Aprovecho. El PEMS muestra en pantalla los niveles de emisiones en tiempo real. También calcula emisiones totales de CO, CO₂, y PM liberados durante una prueba de cocinado. El análisis provee emisiones totales, emisiones específicas, factores de emisión y ratios de contaminantes/CO₂ que realzan los factores de eficiencias de combustión [aprovecho.org]. Utiliza una celda electroquímica para estimar la concentración de CO, un sensor infrarrojo no dispersivo para determinar las concentraciones de CO₂ y un sensor de dispersión de luz para determinar las concentraciones de PM_{2.5}. Los sensores de CO y CO₂ se calibran utilizando un gas que contiene una mezcla de 3000ppm de CO₂ y 100ppm de CO y Nitrógeno como gas de ajuste [MacCarty et al, 2008-a]. Es utilizado en la línea de muestreo de las emisiones de la chimenea para conocer y registrar en tiempo real las concentraciones de CO, CO₂ y PM_{2.5}; además de la velocidad y temperatura del flujo.

Q-TRAK™ Indoor Air Quality Monitor 7575

Provee las mediciones simultáneas en tiempo real de CO, CO₂ humedad y temperatura del flujo, guardando también la base de datos, que soporta más de 39 días de mediciones colectadas con el intervalo de 1minuto. Presenta comunicación vía *bluetooth* para transferencia de datos. Es utilizado en la línea de muestreo de las emisiones intramuros para conocer y registrar en tiempo real las concentraciones de CO, CO₂

3.2.2 Medidor de velocidad

El VELOCICALC se usa para registrar la velocidad y temperatura en tiempo real, guardando también la base de datos, que soporta más de 39 días de mediciones colectadas con el intervalo de 1minuto. Presenta comunicación vía *bluetooth* para transferencia de datos. Se utiliza en la tubería de las emisiones intramuros.

3.2.3 Bomba universal

La Bomba universal SKC permite regular el caudal entre 5 y 4.000 ml/min. Son bombas silenciosas, de gran potencia y libres de pulsaciones. Se usa para la succión de la toma de muestra en el tren de muestreo de las emisiones intramuros con del ciclón de 2.5 μm , el flujo debe ser de 4 L/min. También es necesaria una bomba para el Q-TRAK con un flujo de 2 L/min.

3.2.4 Calibrador de flujo

El calibrador de flujo DEFENDER de MesaLabs sirve para medir el flujo volumétrico, el flujo normalizado, o calibrar los dispositivos que leen el flujo masivo. Se usa para poder conocer, asegurar y calibrar el flujo de succión de las bombas SKC.

3.2.5 Higrómetro

El PROTIMETER TIMBERMASTER WOOD MOISTURE METER es un medidor de humedad avanzado diseñado específicamente para la industria maderera. Es ideal para una gama de aplicaciones de control de calidad asociadas con niveles de humedad dentro de todos los productos de madera, registra humedad en base seca.

3.2.6 Desionizador

El desionizador Sartorius YSTP01 *Stat Pen* sirve para neutralizar cargas electroestáticas por medio de un choque eléctrico, se utiliza antes de pesar los filtros para evitar que el polvo que pueda estar presente interfiera con el peso real.

3.2.7 Balanzas

CITIZEN

CX 265 Citizen Scale India Private Limited es una semi micro-balanza con capacidad máxima de 10 gramos, capacidad mínima de 10 μg y exactitud de 10 μg . Se usa para pesar los filtros de 4in de diámetro.

METTLER TOLEDO

Es una micro-balanza con capacidad máxima de 5.1 gramos, capacidad mínima de 1 µg y exactitud de 1 µg. Se utiliza para pesar los filtros de 37 y 47mm.

3.2.8 Transmisor óptico

El Transmisor Óptico *Magee Scientific "SootScan"™* Modelo OT21 mide la atenuación de luz transmitida a través de un filtro de muestra con respecto a un filtro de referencia. Esta medición se realiza a dos longitudes de onda: 880 nm en el infrarrojo (medición IR); y 370 nm en la Ultra-Violeta (medición UV).

3.2.9 Analizador de carbono total

El equipo CM-150 mide todas las especies de carbono involucradas durante el análisis para dar una medida de carbono total (TC) que contienen el filtro.

La mayor ventaja del analizador es el uso de la detección coulométrica. Empleando los principios de la Ley de Faraday, el Coulómetro CM5 017 CO₂ mide automáticamente la cantidad absoluta de dióxido de carbono resultante de combustión de la muestra o la acidificación. No se requiere calibración del usuario y la detección lineal está disponible desde menos de un microgramo de carbón hasta más de 10000 microgramos de carbón. Usando este proceso coulométrico 100% efectivo, las desviaciones estándar relativas de 0.2% son comunes para materiales estándar. El tiempo de oxidación varía con el tipo de muestra y la temperatura, son típicos análisis de alrededor de 5 a 7 minutos. El Coulómetro es sensible a todo dióxido de carbono que entra en la célula de reacción coulométrica, las varias formas de carbono (TC, TOC y TEC) son diferenciadas por la forma en que se forma el CO₂ ya sea combustión o acidificación.

3.3 Prueba del ciclo de cocinado o controlled burning cycle (CBC)

La mayoría de las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con cambios de las estufas tradicionales a las mejoradas, en países en

desarrollo, vienen dadas por las pruebas del punto de ebullición del agua conducidas en cocinas simuladas. [Johnson et al 2008].

Para tener una referencia que se ajuste más fielmente a lo que realmente pasa en una cocina típica se introdujo el término “ciclo de quemado” en el estudio reportado por [Johnson et al, 2010] para definir a todas las actividades de cocción de alimentos que se llevan a cabo a lo largo del día en un hogar rural, el cuál consiste en la medida de las tasas de emisión y el coeficiente nominal de eficiencia de combustión (la fracción de carbono combustible emitida como CO₂) durante ciclos de quemado en una casa real, subsecuentemente, el CBC incluye realizar pruebas de laboratorio, usando un combustible similar en tipo y composición para recrear la distribución de tasas de emisión y eficiencias de combustión (es decir, los ciclos de quemado del campo). Ya que los ciclos de quemado durante las actividades de cocción en los hogares pueden ser replicados en el laboratorio, asegurando la validez de la prueba. El protocolo es útil para conducir pruebas en estufas durante la etapa de diseño, para comparar alteraciones con las iteraciones previas de la estufa. El CBC provee la oportunidad de cerrar la brecha entre campo y laboratorio; estandarizando la prueba a la vez que se ajusta a las condiciones locales, por lo que ayuda a promover el desarrollo de estufas con mayores eficiencias de combustión y transferencia de calor, al mismo tiempo que permite estimaciones preliminares de emisiones de gases de efecto invernadero [Kshirsagar y Kalamkar, 2014].

Cocinar implica combinar diferentes técnicas o tareas para hacer una comida, como calentar, hervir, hervir a fuego lento, vaporizar, hornear, asar, freír o ahumar entre otros. Cada tarea o técnica tiene una específica y a menudo contrastante demanda de energía en términos del tipo de combustible, tiempos de cocinado y temperatura, además requerimientos específicos por el tipo y tamaño de los recipientes de cocinado. [Ruiz-Mercado y Masera, 2015]

Procedimiento

1.-Se selecciona el grupo de alimentos comunes de una comida típica en la región, en

este caso elegimos un alimento en cada rango de energía: baja, media y alta (véase tabla 2):

Tabla 2: Energía y tiempo de cocinado de algunos alimentos típicos de la región Purhépecha.

Tiempo (min)	Energía		
	Baja	Media	Alta
120			Cocer frijoles
60		Nixtamal	
50	Arroz		Hacer tortillas
20		Calentar comida	
10		Calentar bebidas	
Menos de 10		Calentar tortillas	Freír huevos

Se procede a cocinarlos de acuerdo a el tiempo que se requiere para su preparación, empezando por los que necesitan más tiempo y potencia, teniendo prioridad los que se mantengan calientes más tiempo después de preparados. Hay que tener disponible la cantidad de alimentos para asegurar la prueba.

2.-Con la finalidad de que los alimentos sean cocinados exactamente igual en cada prueba se debe describir con detalle el procedimiento de cocinado para que tanto la cocinera como el evaluador sean capaces de entenderlo y seguirlo, incluyendo de ser posible un factor medible para saber que el platillo está listo, por ejemplo: “cuando el arroz esté inflado y sin agua”.

3.-Una vez que se tenga suficiente combustible (el doble de lo que usualmente se utiliza en la comunidad para preparar dichos platillos) y los pasos para realizar los platillos se hayan descrito y sean bien entendidos por los participantes es posible iniciar la prueba.

La preparación de los alimentos se debe realizar por una persona que le sea familiar la preparación del alimento y el uso de la estufa.

4.-Registrar los datos:

Las condiciones ambientales se registraran en el formato.

Pesar los ingredientes y registrarlo; hacer las preparaciones correspondientes: lavar, pelar, cortar, etc. de acuerdo a la descripción en el paso 2.

Empezar con un paquete de leña que pese el doble de lo que recomienden las personas de la comunidad para preparar dichos alimentos, a la cual se le mide el contenido de humedad con el *Protimeter Timbermaster* Medidor de Humedad, con un promedio de nueve mediciones por prueba, registrándolo apropiadamente en el formato.

Con la estufa fría la cocinera iniciará el fuego de la manera que acostumbre hacerlo en la comunidad. Iniciar el tiempo y registrarlo en el formato correspondiente, así como la medición de emisiones con el *Portable Emissions Measurement System (PEMS)* para las emisiones de campana, y el Qtrack y Velocicalc para las emisiones fugitivas; encender también la bomba para los ciclones con los filtros de muestra.

Mientras la cocinera realiza la tarea de cocinado hay que registrar todas las observaciones relevantes que la cocinera haga por ejemplo: calor excesivo, dificultades de uso, humo, inestabilidad de la estufa,etc.

Cuando los alimentos estén listos registrar el tiempo en el formato correspondiente. Retirar los recipientes con comida de la estufa y pesar cada uno, registrando los datos en gramos en el formato correspondiente.

Retirar la leña no quemada del hogar y extinguir el fuego, remover el carbón de la punta y pesar la leña junto con la que no se utilizó. Colocar el carbón en la bandeja de metal para pesarlo. Registrar ambas mediciones en el formato.

La prueba se ha completado, ahora puede proceder a disfrutar de los platillos

elaborados o proceder a probar la siguiente estufa. Cada estufa se debe probar al menos cinco veces.

De acuerdo a observaciones realizadas en campo en los hogares rurales de la región de Michoacán México de la forma en la cual los usuarios de la estufa Patsari cocinan sus alimentos se obtuvo el ciclo de cocinado, que fue validado por las cocineras de la región que contribuyeron en la realización de las pruebas [Medina, 2017].

Los alimentos seleccionados para la prueba son: 1lt de agua, 3kg de tortilla, sopa de arroz (1/2kg de arroz), 1/2kg de frijoles hervidos para freír y 5 huevos; se inicia con la elaboración de las tortillas, después el agua a hervir, la cual se usará para la preparación del arroz, que será el siguiente, se continua con los frijoles y se termina con los huevos fritos.

3.4 Toma de las muestras

Las estufas se evaluaron en la cabaña simulada, que se construyó con las características de las cocinas de la región, agregando además la función de que el techo sirva como una campana para la medición de las emisiones fugitivas, ésta se encuentra en propiedad del Grupo Interdisciplinario de tecnología rural apropiada (GIRA) en Tzentzenguaro Michoacán (ver anexo A). Las emisiones provenientes de los dispositivos de cocción se captan por medio de una campana de emisiones de chimenea y se transportan por medio de un tren de muestreo unido a dicha campana con una T, el cual es de acero, de 6 pulgadas de diámetro con una longitud de 2.3m, desde la salida de la campana hasta la toma de muestra (la ISO CD 19869:2016, recomienda sea al menos de 1.8m y máximo 10m), la recolección de la muestra, en dicho tren de chimenea, se lleva a cabo por tres sondas dirigidas en dirección contraria al flujo de gases en el túnel de dilución, dos de ellas se conectan al sistema gravimétrico, la tercera sonda va conectada al PEMS. El tren de muestreo de las emisiones intramuros va desde el techo que funciona como campana unido por un codo

de 90 grados, con una longitud de 3.2m hasta la toma de muestra, la recolección de la muestra se hace por medio de el Q-TRAK y el sistema gravimétrico, como se muestra en la figura 8.

3.4.1 Sistema Gravimétrico

El tren de muestreo de las emisiones de la chimenea consta de una bomba que succiona, gracias al orificio crítico, un flujo de 16.7 L/min para el filtro de fibra de vidrio de 4 pulgadas de diámetro, que se coloca en el casete para filtro (ILPH-102, HI-Q *Environmental Products*; San Diego, CA) con su respectivo ciclón o impactador de partículas para separar $PM_{2.5}$ (URG-2000-30 EHS, URG; Chapel Hill, NC); dicha bomba también hace succión para el filtro de cuarzo de 47mm de diámetro colocado en su portafiltro., asegurando 3 L/min por su orificio crítico, cuenta con su respectivo ciclón para separar material particulado 2.5.

El tren de muestreo de las emisiones intramuros consta de una bomba SKC que provee un flujo de operación de 4 IL/min para capturar material particulado 2.5 en un filtro de fibra de vidrio de 37mm que se coloca en un casete con su respectivo portacasete y ciclón.

3.5 Medición de Carbono

Se analiza OC (Carbono orgánico) y EC (Carbono elemental) con el método termo-óptico (CM 150) y CN(Carbono negro) con el método óptico (SootScan).

3.5.1 Método óptico

En el análisis óptico, el coeficiente de absorción de masa de carbono negro (σ) es el factor utilizado para convertir la atenuación del haz la luz debido a la absorción por el contenido de aerosoles de carbono negro depositadas en el filtro. La concentración de carbono negro (C_{CN}) se refiere a la atenuación de la radiación de luz a través del medio de acuerdo con la ley de Lambert-Beer

$$\frac{I}{I_0} = e^{-b_e x} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Dónde I e I₀ representan las intensidades luminosas incidente y transmitida, respectivamente, x la longitud atravesando por la radiación, b_e coeficiente de extinción.

$$C_{CN} = \frac{b_e}{Q} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Cuando se utiliza el análisis óptico de partículas recogidas en un filtro

$$\frac{L_b}{L} = e^{-b_e \frac{V_m}{A_m}} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

L_b y L son los valores de intensidad de radiación que pasa a través de un filtro blanco y un filtro muestreado, V es el volumen de aire muestreado y A es el área en que las partículas se recogen.

De hecho, hay diferencias en las propiedades ópticas de los aerosoles en la atmósfera y las partículas depositadas en un medio filtrante. En el filtro de interferencia de dispersión de la radiación por las fibras del filtro que aumenta la fracción de luz incidente en partículas de negro y en consecuencia, el coeficiente de absorción de carbono negro depositados. [Afonso, 2004]

En el Soot scan el factor de 100 es por conveniencia numérica: sin este factor, la definición es simplemente la densidad óptica de transmisión. En estas unidades, y con la medición realizada con luz blanca, encontramos que un valor ATN de 1 es apenas perceptible (un contraste entre 'depósito' y 'espacio en blanco' de solo 1%), mientras que un valor ATN de 100 corresponde a un mancha de aerosol que es bastante gris oscuro. [Hansen, 2005]. La medida de absorción de luz a 880nm se interpreta como BC y la medida a 370nm se designa como UVPM se interpreta como un indicador de compuestos orgánicos aromáticos como los que se encuentran en el humo del cigarro, quema de biomasa/madera. 1 ATN equivale a 0.06 µg/cm² de CN en filtro.

3.5.2 Termo-óptico

Los métodos térmicos más usuales, implican la recogida del aerosol sobre un filtro de fibra de cuarzo con la consiguiente evaporación de las partículas de filtro por análisis térmico y químico de los gases producidos.

La muestra es pesada inicialmente en un “bote” de platino o porcelana. El bote se coloca en un cucharón de cuarzo que se introduce en la atmósfera de oxígeno a alta temperatura (típicamente 950°C) con la muestra en la zona de combustión. En este ambiente todo el carbón contenido en la muestra es rápidamente oxidado a CO₂.

Los productos de reacción de interferencia (incluyendo óxidos de azufre, haluros, agua y óxidos nitrosos) se eliminan mediante depuradores posteriores a la combustión. El dióxido de carbón resultante es entonces barrido hacia el Coulometro CM5017 donde se mide automáticamente usando valoración coulométrica absoluta, como se muestra en la figura 4.

Aunque el análisis directo de carbono orgánico total (TOC) de sólidos se realiza ocasionalmente usando varios métodos de pretratamiento de muestra, generalmente se recomienda calcular TOC por diferencia, donde $TOC = TC - TEC$

Carbono elemental total (TEC)

Al introducir una muestra en el matraz de muestra, el sistema se purga con un gas portador libre de CO₂ para eliminar el dióxido de carbono atmosférico.

En ese punto, el análisis se inicia añadiendo una alícuota de ácido a través del dispensador de ácido en el matraz de muestra, haciendo que el carbono inorgánico sea convertido en CO₂. Utilizando el calentador incorporado y el agitador magnético para facilitar la rápida evolución del carbono inorgánico, el gas portador libre de CO₂ transporta los productos de reacción a través de un post-depurador (para eliminar posibles interferencias) y finalmente a la célula de reacción dentro del Coulometer CM5017. Entonces el dióxido de carbón resultante es medido automáticamente usando la titulación coulométrica absoluta.

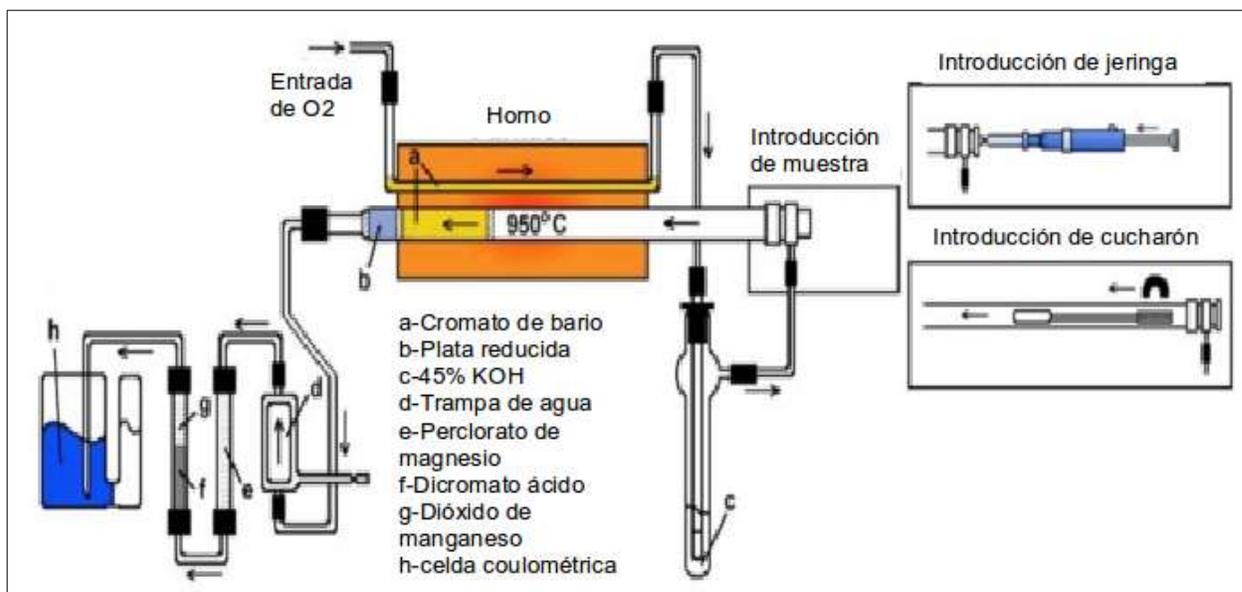


Figura 4: Funcionamiento del medidor de carbono CM-150

3.6 Procesamiento de datos

Para realizar el análisis de las emisiones de las estufas y el fogón tradicional, el balance de carbono es lo primordial. Dicho balance cuantifica la entrada de carbono (carbono en el combustible) y salida de carbono (carbono en los contaminantes PM_{2.5}, CO y CO₂). Una de las ventajas de usar el balance de carbono para determinar los factores de emisión es que este enfoque requiere la medida de los radios de emisión, pero no la masa absoluta de carbón, de los contaminantes atmosféricos. Esto significa que la posición de la sonda de muestreo puede ser relativamente flexible en la corriente de gas, porque se puede asumir razonablemente que todos los contaminantes atmosféricos experimentan el mismo factor de dilución en una posición de muestreo en el gas de combustión. [Zhang et al, 2000] El cual, para considerarse correcto debe tener como resultado un balance de carbono del 100% ± 20%, de acuerdo a la ecuación 3.4.

$$BC = \frac{C_{sale}}{C_{entra}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

donde:

BC es el balance de carbono

C_{sale} es el carbono en los contaminantes

C_{entra} es el carbono en el combustible

Para conocer el carbono a la entrada y la salida respectivamente, se mide gravimétricamente el combustible antes y después del período de prueba, tomando un contenido de carbono en el encino blanco seco de 48.41% de acuerdo a Aguirre-Calderón y Jimenez-Pérez (2011), así mismo se asume un 81% de contenido de carbono en el carbón residual como se reporta en Smith et al. (2000^a) se utilizan las ecuaciones reportadas por Zhang et al, (2000). El contenido de humedad en la leña se

mide con el equipo Protimeter Timbermaster Medidor de Humedad, con un promedio de nueve mediciones por prueba.

Carbono a la entrada:

$$C_{entra} = L_h * (1 - H_h) * (C_{Leña}) - (C * C_{carbón}) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

donde:

C_{entra} es el carbón en los combustibles

L_h es la madera húmeda consumida

H_h es la humedad de la leña en base húmeda

$C_{Leña}$ es la cantidad de carbono en la madera

C es la cantidad de carbón producido durante la prueba

$C_{carbón}$ es el contenido de carbón en el carbón residual

Carbono salida:

$$C_{sale} = \left(\frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM2.5}} * C_{entra} \right) + \left(\frac{C_{CO}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM2.5}} * C_{entra} \right) + \left(\frac{C_{PM2.5}}{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{PM2.5}} * C_{entra} \right) \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

donde

C_{sale} es el carbono en los contaminantes

C_{entra} es el carbono en el combustible

C_{CO_2} , C_{CO} , $C_{PM2.5}$ son el promedio de las concentraciones medidas, respectivamente, por el PEMS

El equipo *Protimeter Timbermaster* Medidor de Humedad mide la humedad en base seca, para obtener la humedad en base húmeda se requiere de la siguiente ecuación:

$$H_h = \frac{H_s}{1+H_s} \quad (3.7)$$

Dónde:

H_s es la fracción de la humedad base seca

H_h es la fracción de la humedad base húmeda

Otro parámetro importante es la eficiencia nominal de combustión (ENC) la cual se determina mediante la relación molar (moles) de CO_2 dividida entre la sumatoria de la cantidad de CO_2 y CO , siguiendo la siguiente ecuación:

$$ENC = \frac{\text{moles de } CO_2}{\text{moles de } (CO_2 + CO)} * 100 \quad (3.8)$$

Ésta debe ser mayor de 90% para estufas mejoradas y mayor de 80% para el fogón.

3.7 Factores de emisión

Los factores de emisión (EF) se determinan con la cantidad de contaminante en función del combustible consumido (g de carbón/ Kg de leña quemada). Por ejemplo para el CO_2 :

$$EF_{CO_2} = \frac{CO_2(g)}{(\text{Carbón}(g)/\text{Fracción de carbón})} \quad (3.9)$$

Con la ecuación 3.10 se calcula el número de Reynolds, el cual, es laminar por debajo de 2000 y turbulento por encima de 4000

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.10)$$

siendo:

ρ la densidad del fluido

v la velocidad del fluido

D diámetro de la tubería

μ la viscosidad cinemática

3.8 Materia orgánica

La materia orgánica se estima multiplicando el OC por 1.9 como recomienda Roden [2006] para combustión de pino o encino. “La masa total asociada con aerosoles carbonaceos, definida como materia orgánica más carbono elemental es estimada de las mediciones de EC y OC”.

Típicamente : OM/OC = 1.2 a 3.1 (Usar 1.9)

Generalmente el estimado OM + EC (factor de emisión) concuerda bien con el factor de emisión de PM [Roden y Bond 2006, Turpin y Lim 2001, Smith et al 1993].

3.9 contribución de los productos de combustión en el efecto invernadero

Para determinar el impacto agregado del calentamiento de las emisiones gaseosa de los dispositivos, las contribuciones al efecto invernadero se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación tomada de Johnson et al [2008]:

$$GWC = \sum GWPI_i \times GHGi \quad (3.11)$$

Donde GWC es la contribución de las emisiones gaseosas, $GWPI$ es el potencial de calentamiento a 100 años de cada gas, $GHGi$ es la cantidad de cada gas.

Se usó un 80% de renovabilidad de combustible, como se determinó con el modelo WISDOM para la región Purhépecha [Ghilardi et al, 2007].

Capítulo 4. Resultados

4.1 Diseño de trenes de muestreo

Para el diseño de los trenes de muestreo se tomaron en cuenta las recomendaciones de la norma en revisión ISO 19867-1:2015(DRAFT) *Clean cookstoves and clean cooking solutions Harmonized laboratory test protocols*, la cual sugiere que cada tren de muestreo tenga al menos un codo de 90° situado arriba de la sección de muestreo; la campana sea de acero con una longitud mínima de 0.6m en el extremo abierto; un tunel recto que una la campana con el tunel de dilución, asegurando un flujo turbulento; se colocan dos semicírculos de acero a 90° del eje del conducto en lados opuestos funcionan como deflectores; el punto de muestreo se colocará en el tunel de dilución al menos a 12 diámetros de distancia de la salida de campana, sin superar los 10m; se debe usar un extractor para extraer gas del tunel de dilución con suficiente flujo para mantener el flujo volumétrico requerido, como se muestra en las figuras 5, 6 y 7.

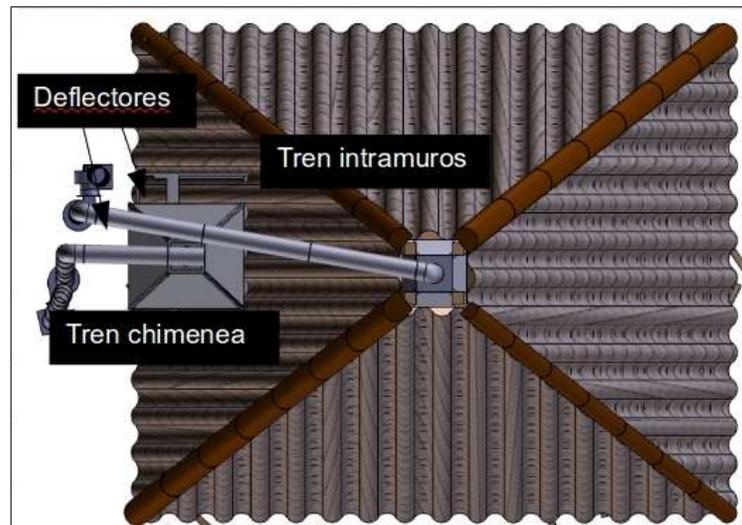


Figura 5: Tren de muestreo vista superior

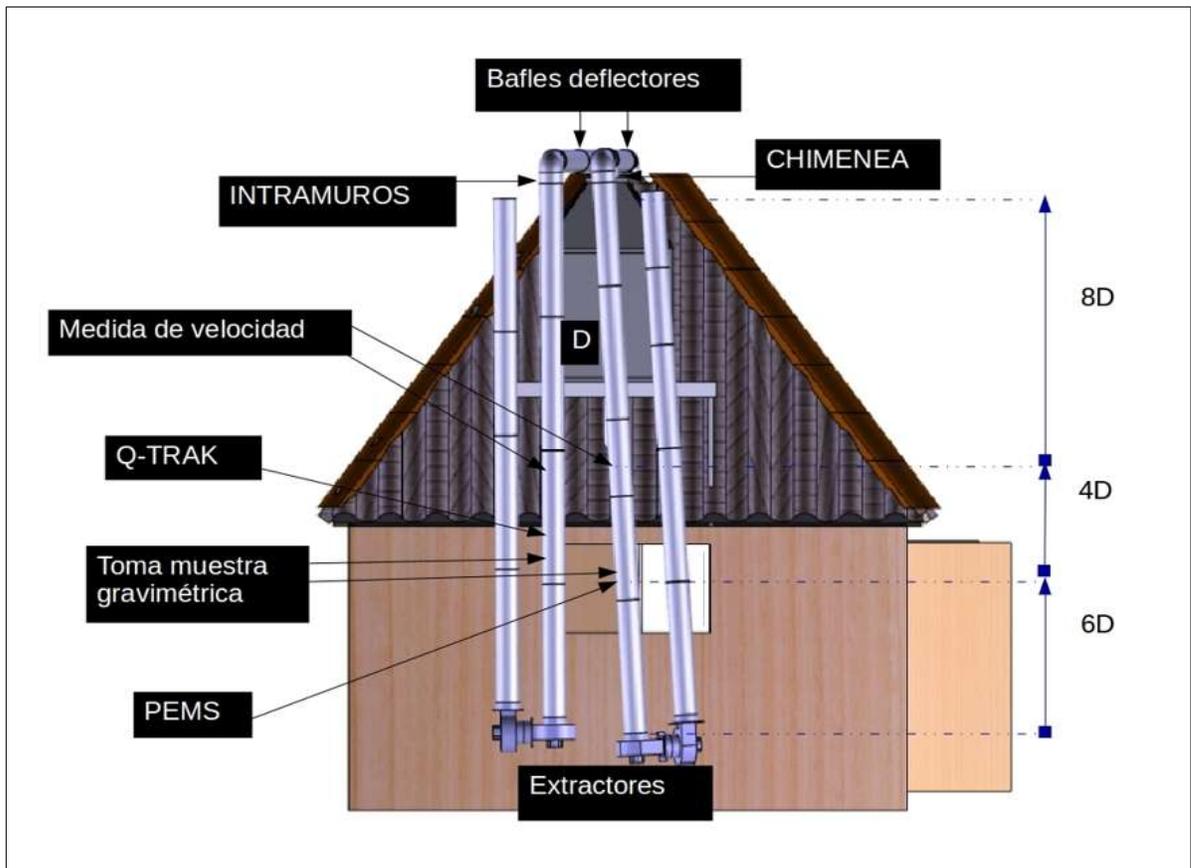


Figura 6: Tren de muestreo chimenea e intramuros

Para el tren de chimenea se tiene una velocidad de 10m/s con lo cual el número de Reynolds es de 94602, asegurando un flujo turbulento.

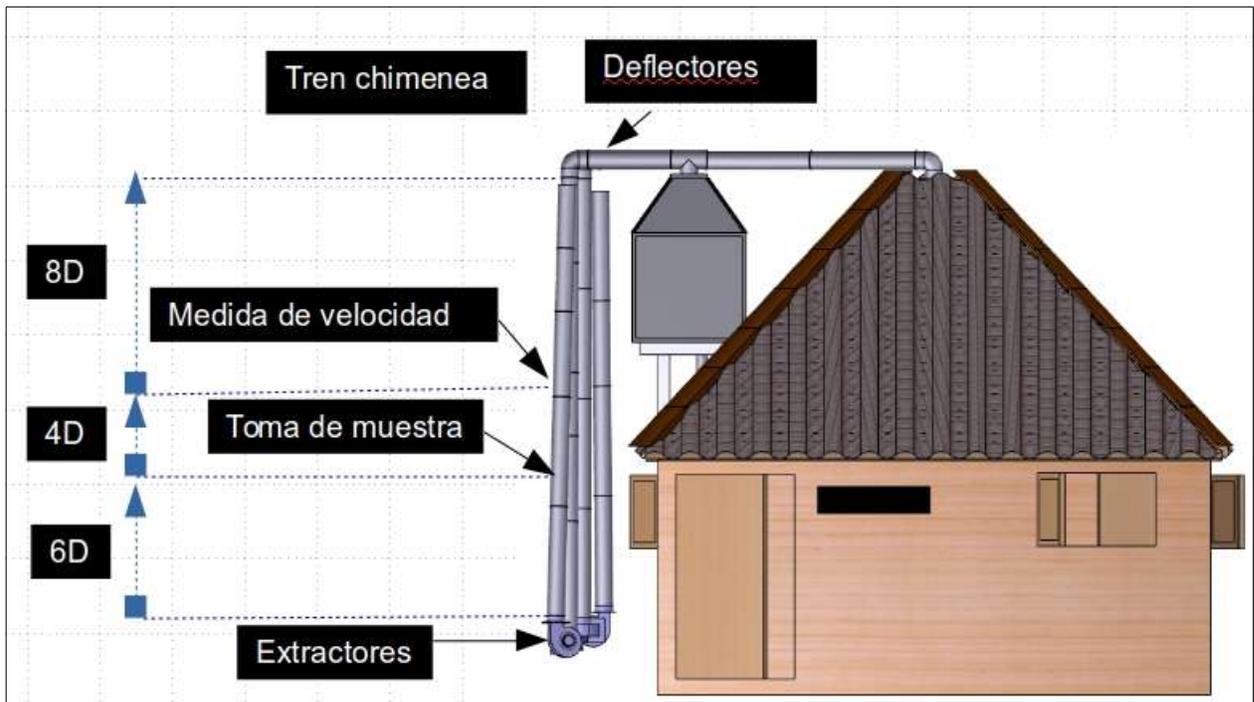


Figura 7: Tren de chimenea

Se midió la caída de presión en el tren de muestreo de chimenea, con los datos de la prueba que relaciona caída de presión y velocidad, realizada con anterioridad (Figura 8) es posible conocer la velocidad en la tubería.

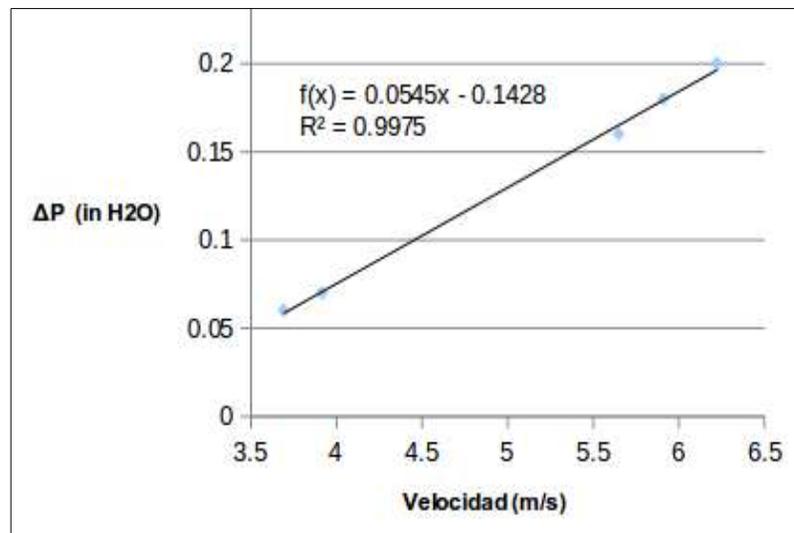


Figura 8: Estimación de los coeficientes de la regresión lineal de la velocidad contra la caída de presión ($p_{\text{valor}}=0.000$)

4.2 Resultado de pruebas.

Se realizaron pruebas de ciclo de cocinado en tres estufas mejoradas: PATSARI, ECOSTUFA y ONIL, y en la estufa tradicional: Fogón “U”, se hicieron cinco repeticiones en cada dispositivo, de las 20 pruebas los resultados se muestran a continuación; la tabla 3 concentra el balance de carbono, que en todos los casos quedó dentro del límite esperado ($100\pm 20\%$), lo cual indica que la cantidad de emisiones capturadas son adecuadas para considerar satisfactoria a la prueba. El consumo de leña tiene diferencia significativa según la prueba de Tukey, entre el Fogón “U” y la estufa ONIL, y entre la estufa PATSARI y la estufa ONIL; la cantidad de leña consumida del Fogón “U” fue 7.5% más que la estufa PATSARI, 19% más que la estufa ECOSTUFA, y 150% más que la estufa ONIL; como se muestra en las figuras 9 y 10. El tiempo de cocinado no tuvo diferencia significativa entre dispositivos, según la prueba de Tukey, siendo el Fogón “U” el que presentó los menores tiempos de cocinado: 11% menos que la estufa PATSARI, 9% menos que la estufa ECOSTUFA y 0.8% menos que la estufa ONIL, como se puede apreciar en las figuras 11 y 12. Los resultados de consumo de leña y tiempo de cocinado de la estufa PATSARI son comparables con los obtenidos por Medina[2017] (4.07 ± 0.28 kg para la leña y 110 ± 17 min para el tiempo), no así los resultados del Fogón “U”, que consumió más leña y la prueba duró menos tiempo (4.72 ± 0.46 kg para la leña y 103 ± 12 min para el tiempo).

Tabla 3. Balance de carbono, consumo de leña y tiempo de cocinado por dispositivo en prueba CBC

Dispositivo	Balance de carbono	Consumo leña	Tiempo
	% \pm DE	g \pm DE	min \pm DE
Patsari	102 \pm 6	3596 \pm 273 ^A	135 \pm 18 ^A
Ecostufa	105 \pm 11	3243 \pm 914 ^{AB}	132 \pm 49 ^A
Onil	111 \pm 5	2577 \pm 261 ^B	122 \pm 15 ^A
Fogón “U”	91 \pm 4	3875 \pm 376 ^A	121 \pm 1 ^A

El número de repeticiones por dispositivo es N=5, la variabilidad se expresa como \pm (DE, desviación estándar). Las letras A y B representan la agrupación de los dispositivos con la prueba de Tukey y 95% de intervalo de confianza. Los promedios que no comparten letra son diferentes significativamente.

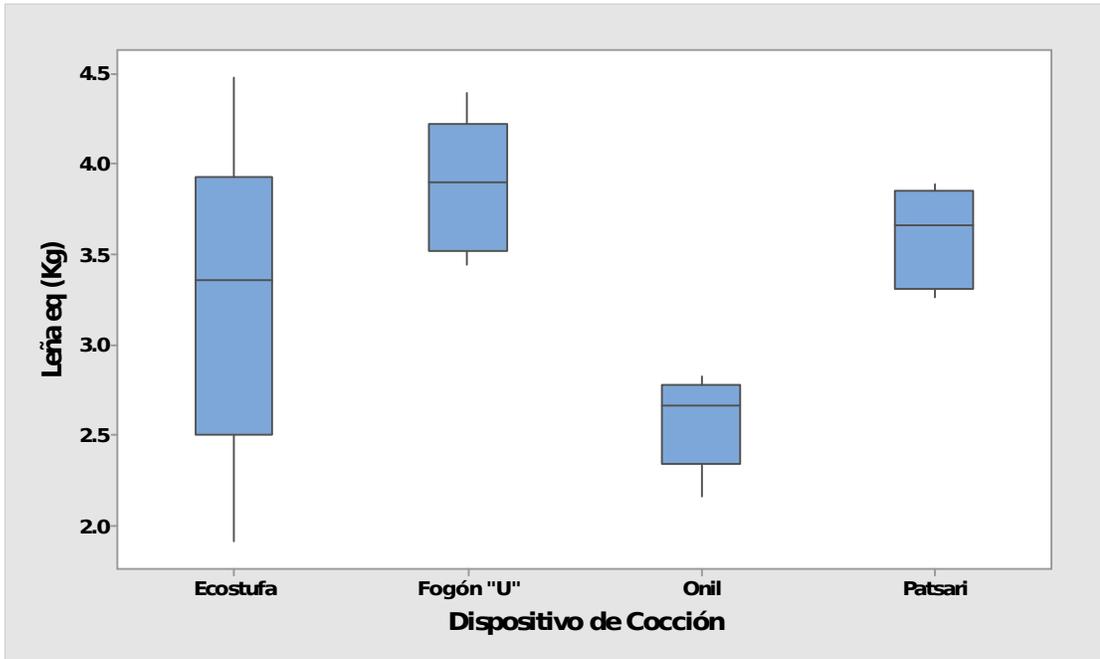


Figura 9: Diagrama de caja de leña consumida en promedio por dispositivo para prueba CBC

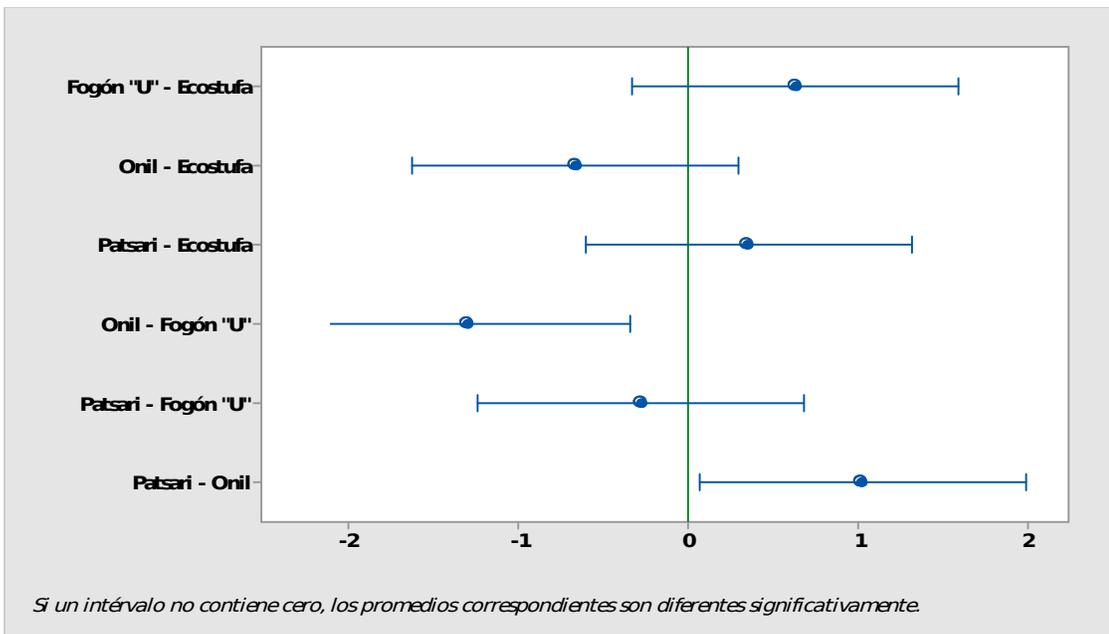


Figura 10: Resultado prueba de Tukey para promedios de leña consumida, con 95% de intervalo de confianza

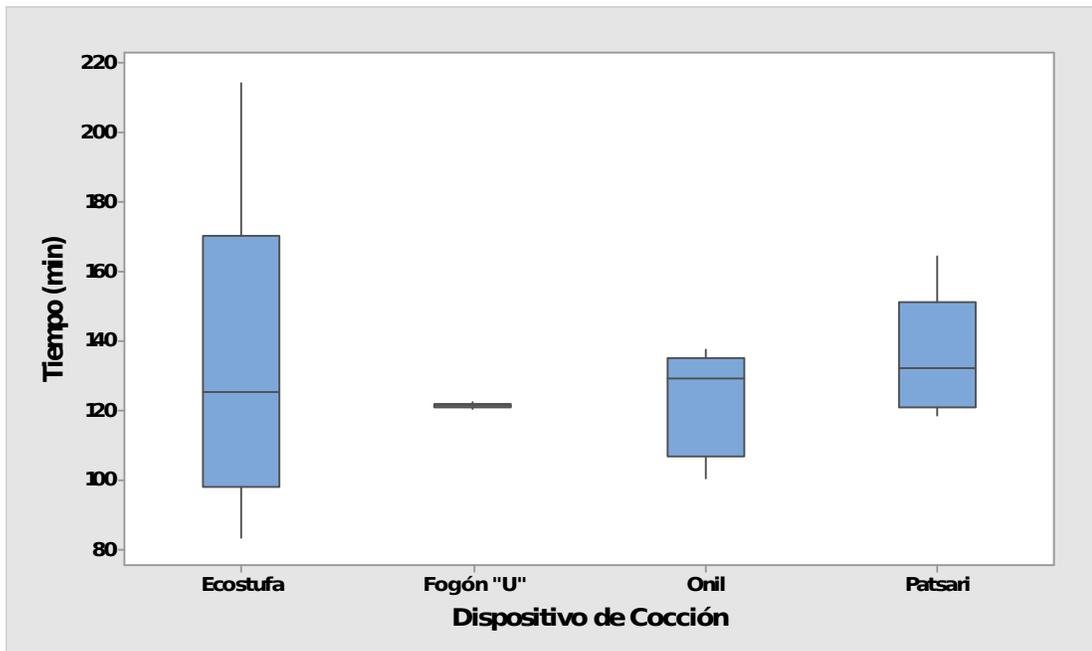


Figura 11: Diagrama de caja de tiempo de cocinado

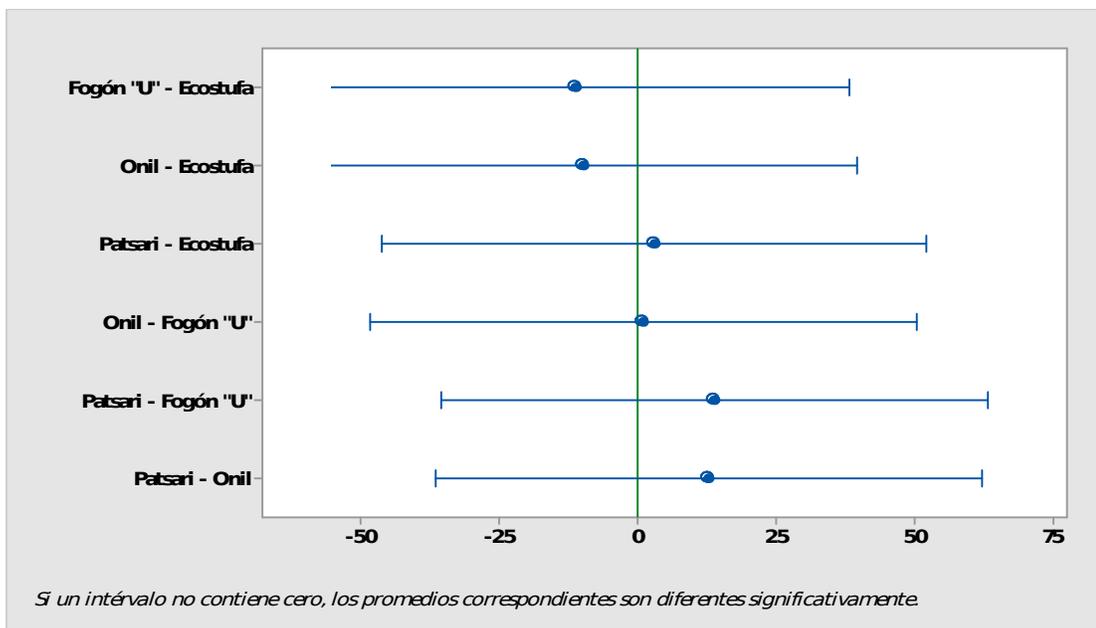


Figura 12: Resultado de la prueba de Tukey para promedio de tiempo de cocinado, con 95% de intervalo de confianza.

El contenido de carbono orgánico y carbono elemental se encontró mediante el método termo-óptico con el uso del Analizador de Carbono CM-150, haciendo el análisis por triplicado y presentando el promedio de éste: por su parte el carbono negro se analizó con el método óptico con el transmisor SootScan, también por triplicado. Los resultados se presentan concentrados en la tabla 4. La figura 13 representa los gramos de carbono total promedio de cinco repeticiones por dispositivo, se observa que el Fogón “U” emite 29% más carbono total que la estufa PATSARI, 4% menos que la estufa ECOSTUFA y 220% más que la estufa ONIL. El Carbono Orgánico está representado en la figura 14, donde se aprecia que el Fogón “U” emite 25% más que la estufa PATSARI, 9% menos que la estufa ECOSTUFA y 191% más que la estufa ONIL. En cuanto al Carbono Elemental (figura 15) el Fogón “U” emite 67% más que la estufa PATSARI, 55% más que la estufa ECOSTUFA y 1338% más que la estufa ONIL. En la medición de Carbono Negro (figura 16) el Fogón “U” emitió 7% más que la estufa PATSARI, 12% menos que la estufa ECOSTUFA y 20% más que la estufa ONIL.

Tabla 4. Masa promedio de carbono orgánico OC, carbono elemental EC (medidos ambos con Transmitancia Óptica Térmica) y carbono negro CN (medido con Transmisómetro) en ciclos de cocinado CBC.

DISPOSITIVO	OC (g±DE)	EC (g±DE)	CN (g±DE)
Patsari	7.08 ± 1.98	0.69 ± 0.28	1.25 ± 0.07
Ecostufa	9.75 ± 8.28	0.74 ± 0.49	1.30 ± 0.07
Onil	3.04 ± 0.73	0.08 ± 0.04	0.93 ± 0.22
Fogón	8.86 ± 3.36	1.15 ± 0.45	1.12 ± 0.21

N=5, la variabilidad se expresa como ± DE, desviación estándar.

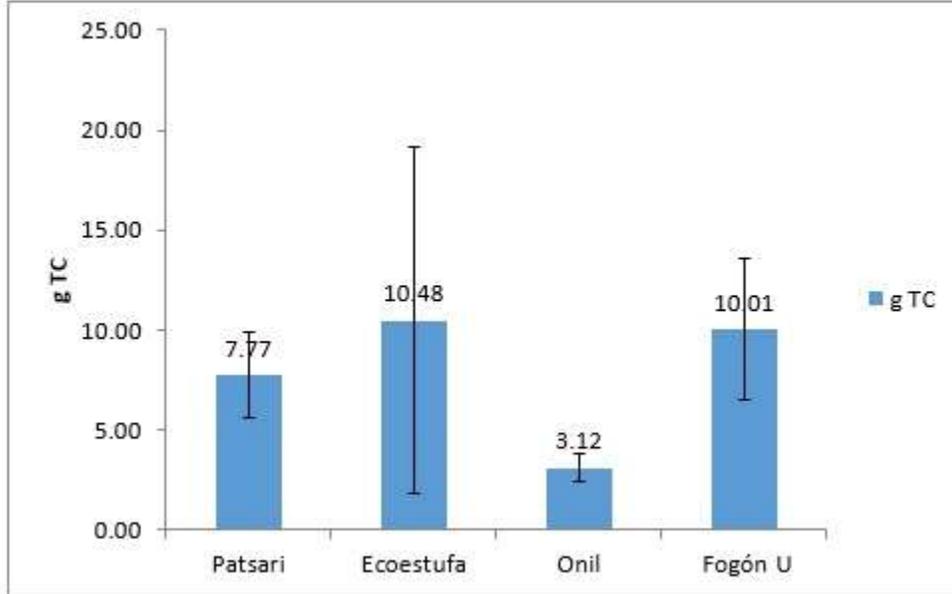


Figura 13: Comparación de masa de Carbono Total por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

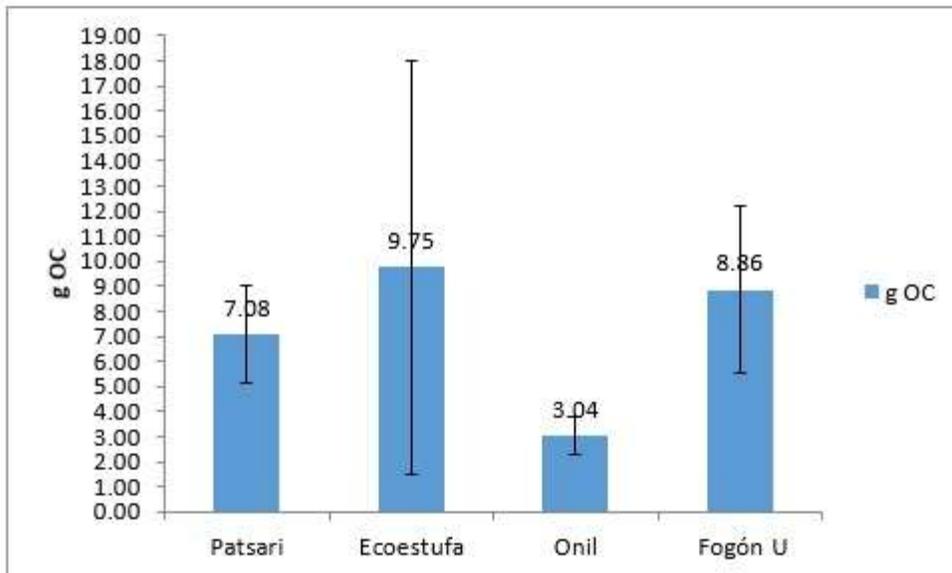


Figura 14: Comparación de masa de Carbono Orgánico por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

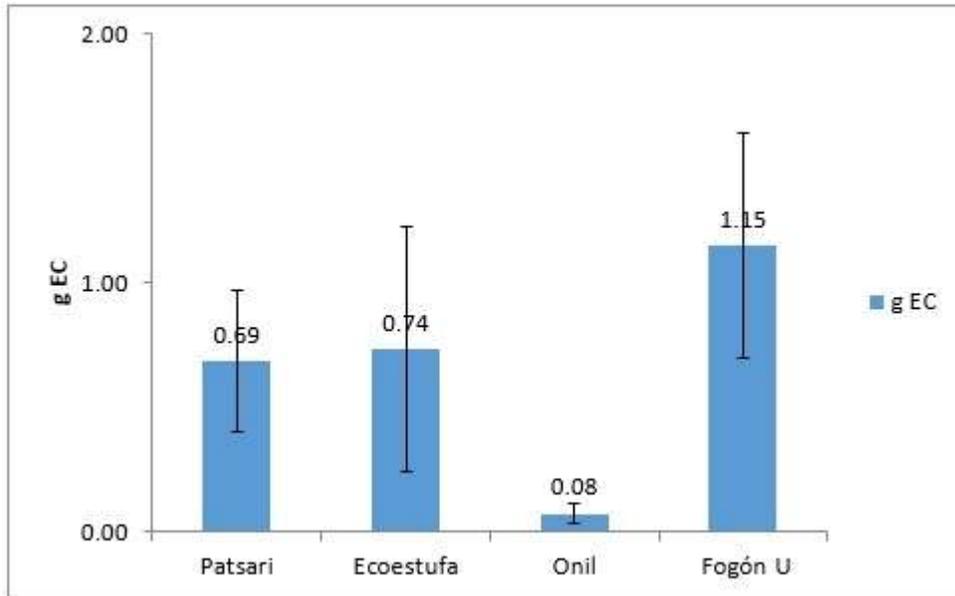


Figura 15: Comparación de masa de Carbono Elemental, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

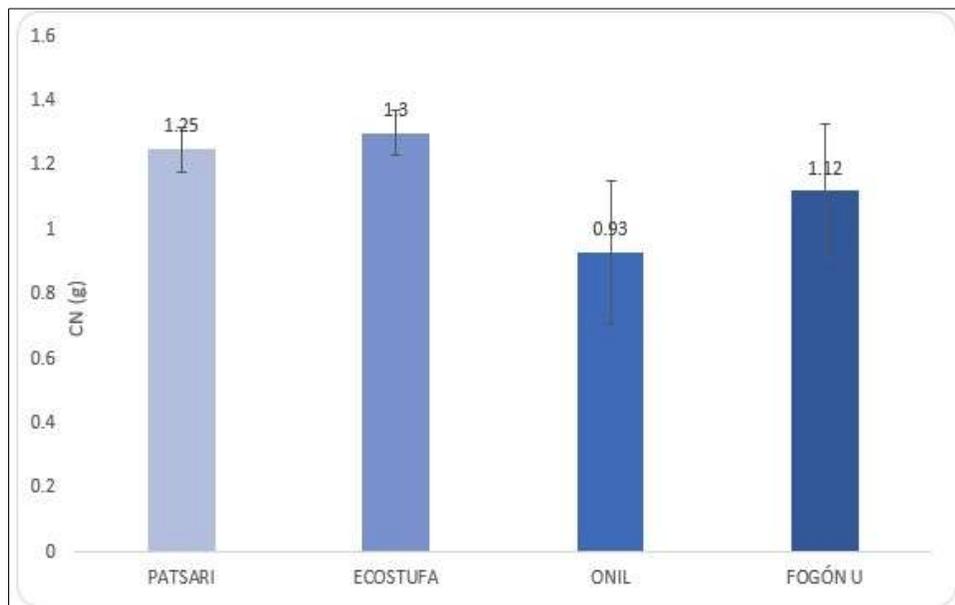


Figura 16: Comparación de masa de Carbono Negro (medido con transmisómetro), promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

La materia orgánica se estimó multiplicando el Carbono Orgánico por el factor de 1.9 como recomienda Roden[2008].

Tabla 5. Masa de Materia orgánica estimada por dispositivo en CBC (Ciclo de cocinado controlado)

DISPOSITIVO	OM (g±DE)
Patsari	13.45± 3.76
Ecostufa	18.52 ± 15.73
Onil	5.78 ± 1.39
Fogón	16.84 ±6.38

N=5, la variabilidad se expresa como ± DE, desviación estándar

Los factores de emisión se determinaron con la cantidad de carbono contenido en el contaminante respectivo por kilo de leña seca consumida durante la prueba CBC, en la tabla 6 se concentran los factores de emisión para CO, CO₂ y PM_{2.5} y en la figura 17 se puede observar que el Fogón U emitió 24% menos CO que la estufa PATSARI, 26% menos CO que la estufa ECOSTUFA y 108% más CO que la estufa ONIL, para la cual el factor de emisión tiene diferencia significativa con los demás dispositivos según la prueba de Tukey, como se muestra en la figura 19. En la figura 20 se observa que el Fogón U emitió 11% menos CO₂ que la estufa PATSARI, 15% menos CO₂ que la estufa ECOSTUFA y 22% menos CO₂ que la estufa ONIL la cual presenta diferencia significativa con el Fogón U según la prueba de Tukey, como se muestra en la figura 22. En cuanto al Material Particulado 2.5 la figura 23 muestra que el Fogón U emitió 55% más que la estufa PATSARI, 12% más que la estufa ECOSTUFA y 241% más que la estufa ONIL, encontrándose diferencia significativa de ésta estufa con el resto de los dispositivos según la prueba Tukey como lo muestra la figura 25. El factor de emisión de CO₂ para la estufa PATSARI y el Fogón concuerda con el reportado por Johnson [2008], 441±22 y 418±19 respectivamente, el factor de emisión de PM_{2.5} para Fogón U es semejante al que reporta Medina [2017a] de 5.5±1.6.

Tabla 6. Factores de emisión CO, CO₂ y PM_{2.5}(expresados como gramos de Carbono por kilogramo de leña seca consumida):

Dispositivo	CO	CO ₂	PM _{2.5}
	gC/Kg±DE	gC/Kg±DE	gC/Kg±DE
Patsari	33±3.71 ^A	473±33.34 ^{AB}	3.44±1.10 ^A
Ecostufa	34±10.67 ^A	492±64.61 ^{AB}	4.78±3.24 ^A
Onil	12±2.71 ^B	535±43.82 ^A	1.56±0.47 ^B
Fogón U	25±3.81 ^A	419±32.97 ^B	5.32±3.12 ^A

El número de repeticiones por dispositivo es N=5, la variabilidad se expresa como ± (DE, desviación estándar). Las letras A y B representan la agrupación de los dispositivos con la prueba de Tukey y 95% de intervalo de confianza. Los promedios que no comparten letra son diferentes significativamente.

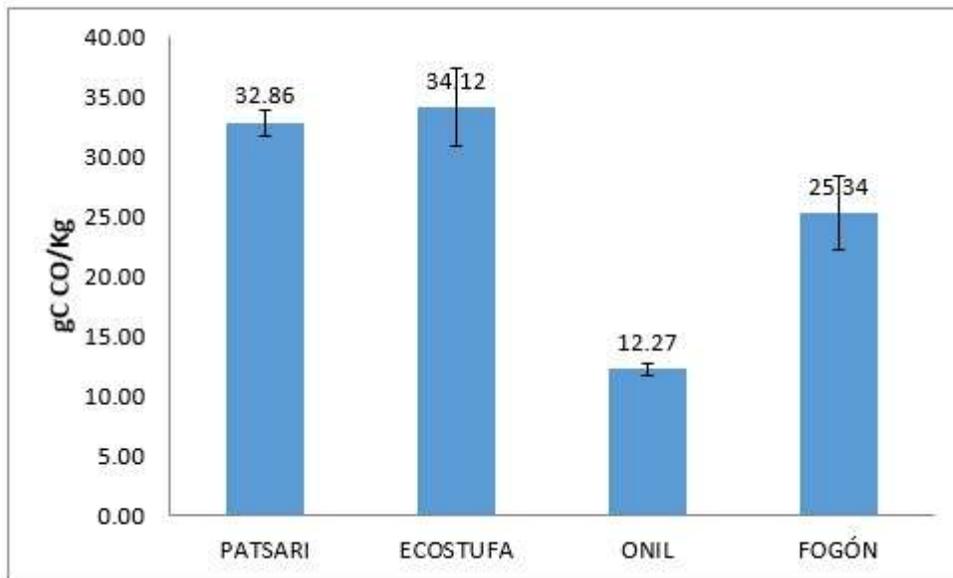


Figura 17: Comparación de Factor de emisión de CO, expresado como gramos de Carbono contenido en el CO por kilogramo de leña consumida, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

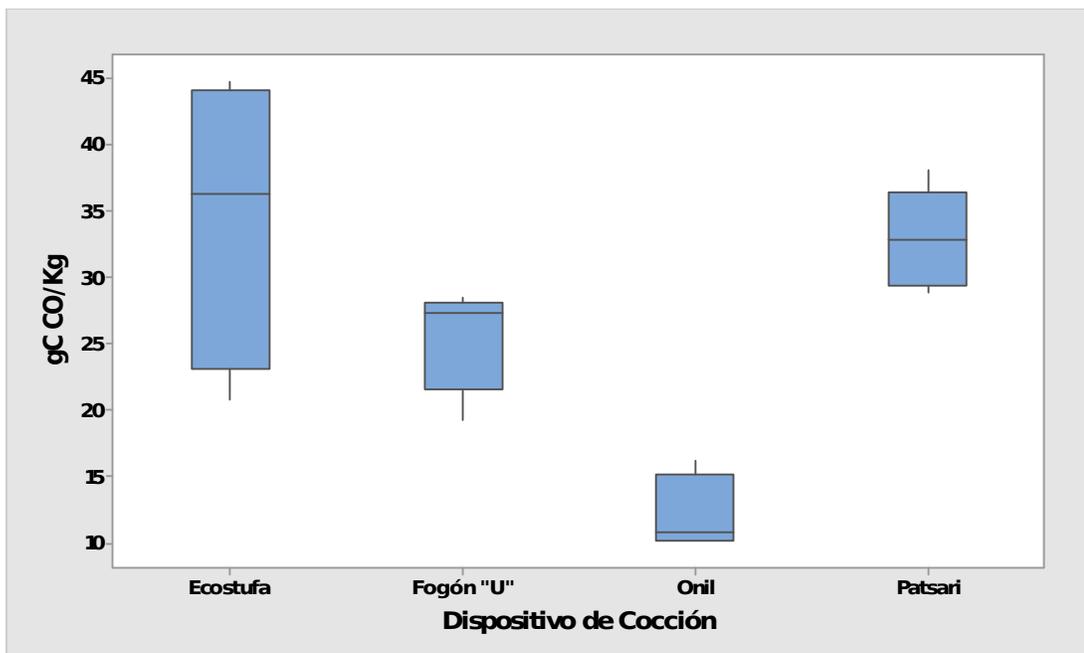


Figura 18: Diagrama de caja de factor de emisión de monóxido de carbono.

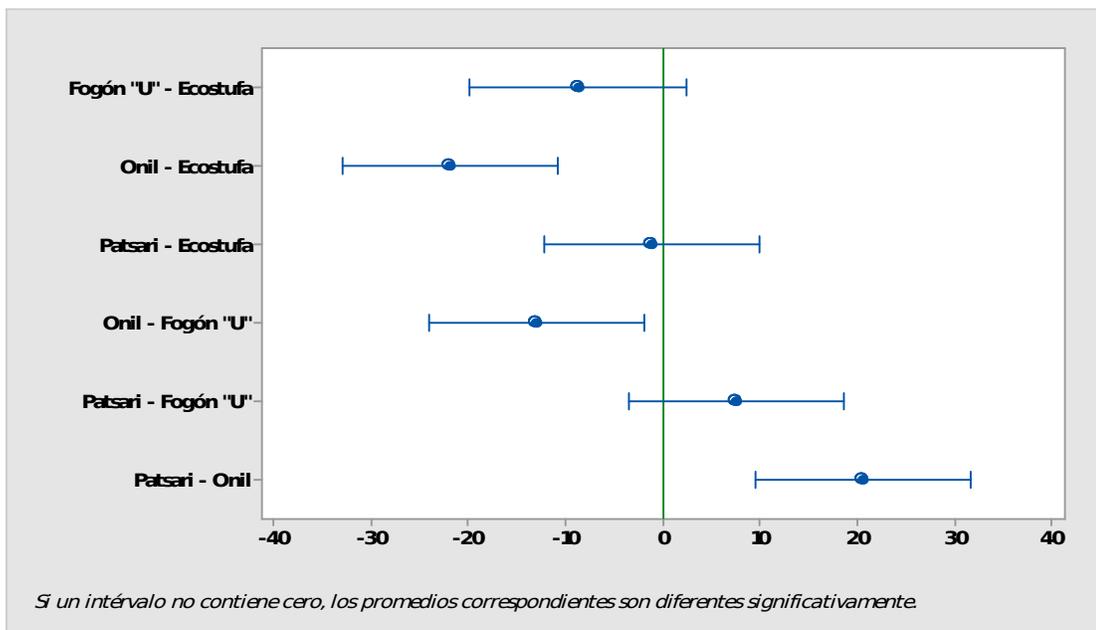


Figura 19: Resultado de la prueba de Tukey para factor de emisión de monóxido de carbono, con 95% de intervalo de confianza.

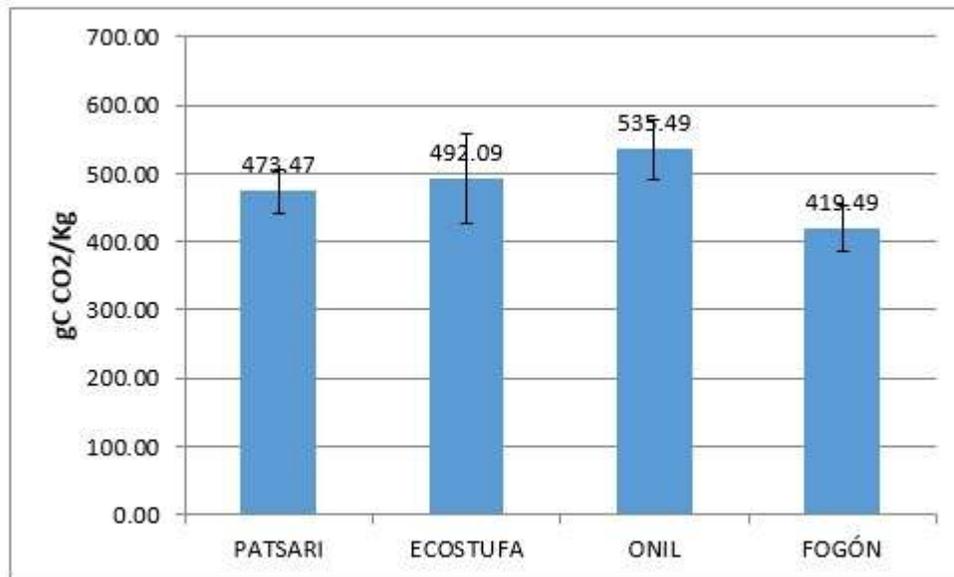


Figura 20: Comparación de Factor de emisión de CO₂, expresado como gramos de carbono en el CO₂ por kilogramo de leña, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

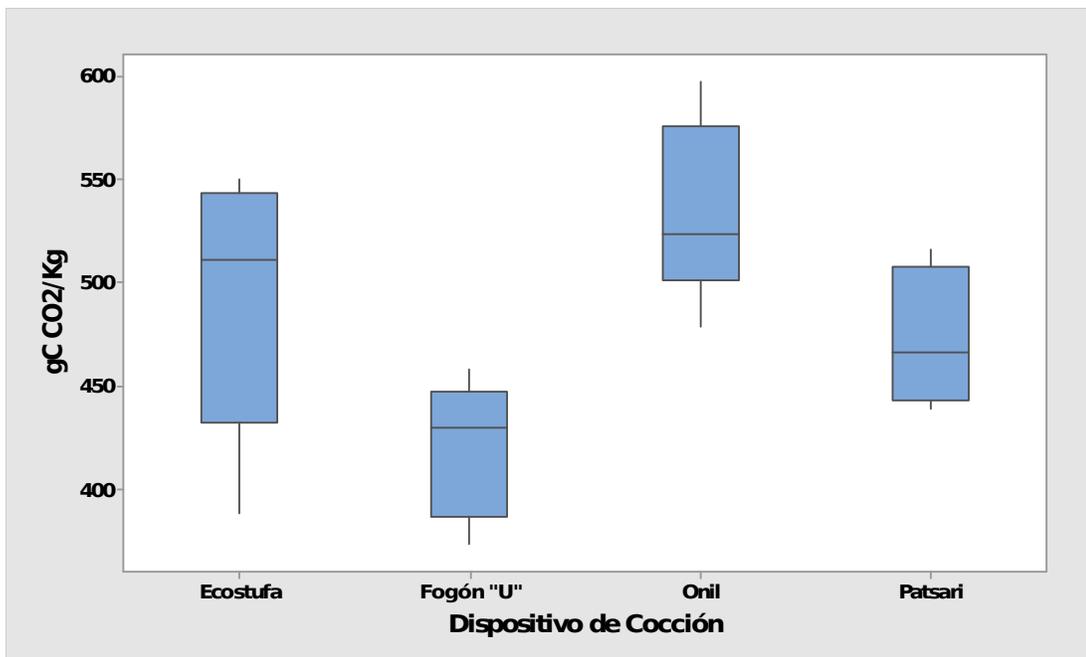


Figura 21: Diagrama de caja de factor de emisión de bióxido de carbono.

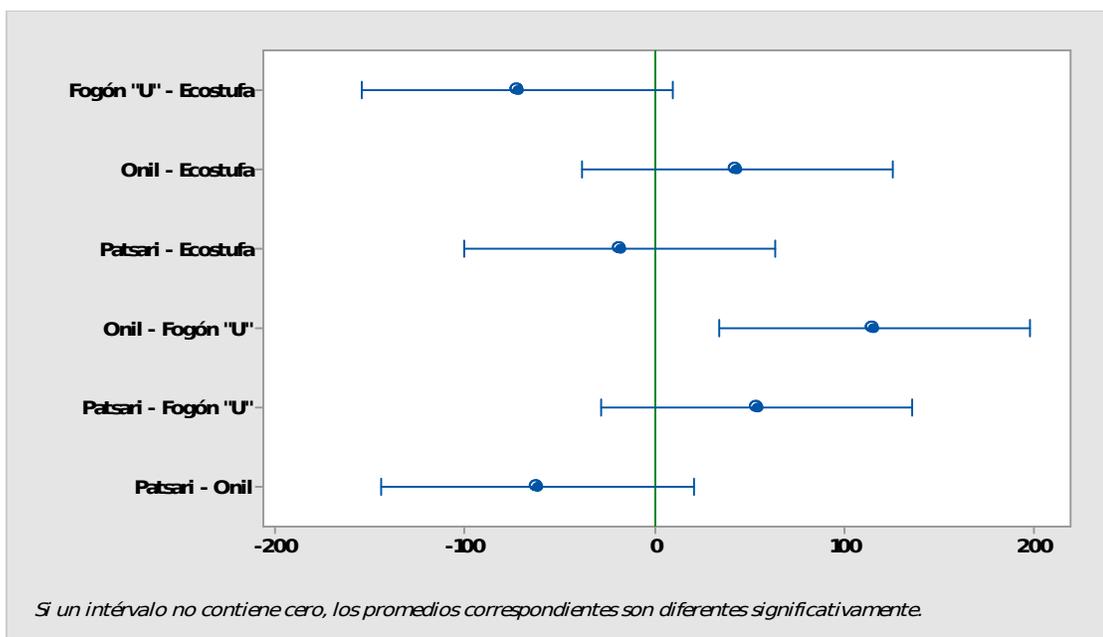


Figura 22: Resultado de la prueba de Tukey para factor de emisión de bióxido de carbono, con 95% de intervalo de confianza.

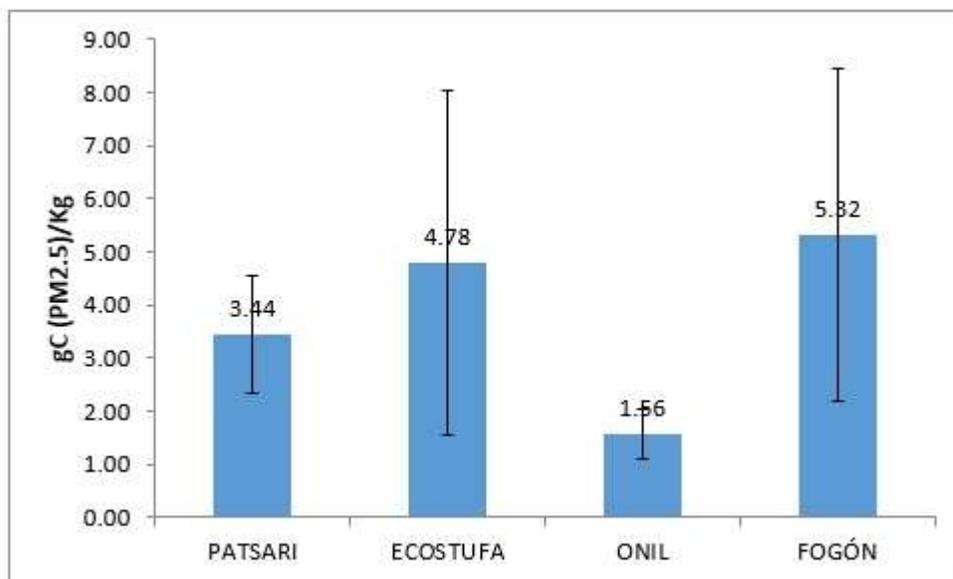


Figura 23: Comparación de Factor de Emisión de Material Particulado, expresado como gramos de Carbono en el PM2.5 por kilogramo de leña, por dispositivo, promedio de cinco repeticiones. Las líneas representan la desviación estándar.

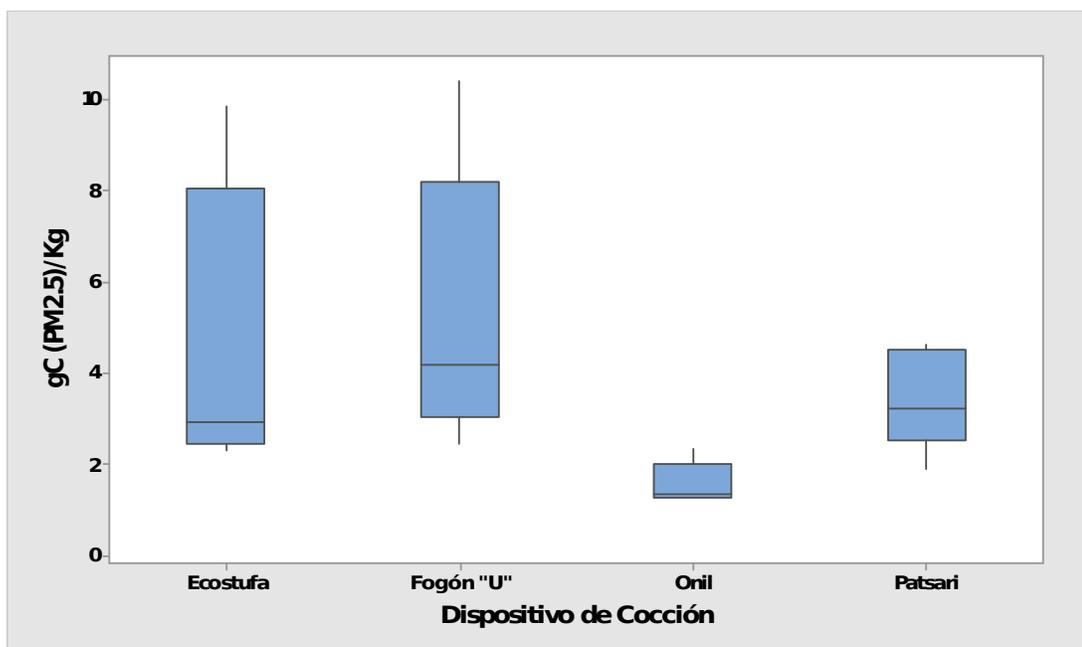


Figura 24: Diagrama de caja de Factor de emisión de Material Particulado 2.5

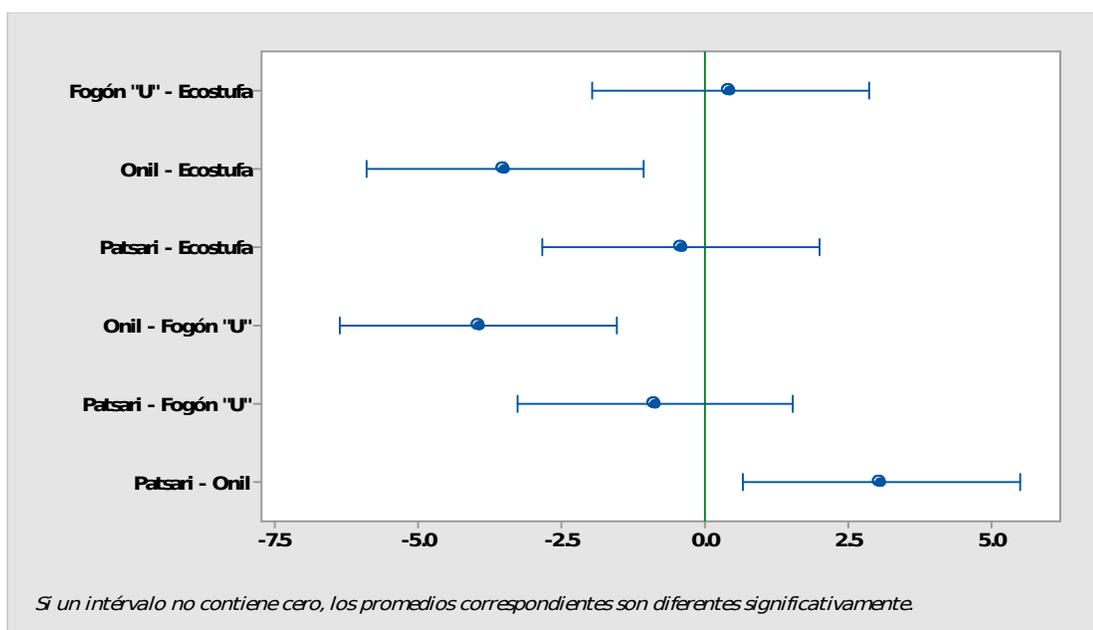


Figura 25: Resultado de la prueba de Tukey para factor de emisión de Material particulado 2.5, con 95% intervalo de confianza.

La tabla 7 concentra los factores de emisión de Carbono Orgánico, Carbono Elemental, Carbono Negro y Materia Orgánica, se puede observar que el Fogón U emite 18% más OC que la estufa PATSARI, 28% menos OC que la estufa ECOSTUFA y 98% más OC que la estufa ONIL; no se encontró diferencia significativa entre los dispositivos evaluados para el factor de emisión de Carbono Orgánico, como se muestra en las figuras 26, 27. Para el Carbono Elemental el Fogón emitió 50% más EC que la estufa PATSARI, 15% más que la estufa ECOSTUFA y 900% más que la estufa ONIL, teniendo diferencia significativa entre ésta y el Fogón U, según la prueba de Tukey, como se muestra en las figuras 28, 29. El factor de emisión de EC concuerda con el reportado por Johnson [2008] de 0.3 ± 0.1 . El factor de emisión de Carbono Negro en general es mayor que el de Carbono Elemental, excepto para el Fogón U, que resultó muy parecido; no se encontró diferencia significativa entre los dispositivos con la prueba de Tukey, como se ve en la figuras 30, 31; el Fogón U obtuvo 3% menos que la estufa PATSARI, 31% menos que la estufa ECOSTUFA, 19% menos que la estufa ONIL.

Tabla 7. Factores de emisión de OC, EC, CN, OM (expresados como gramos de Carbono por kilogramo de leña seca consumida):

Dispositivo	OC	EC	CN	OM
	gC/Kg \pm DE	gC/Kg \pm DE	gC/Kg \pm DE	gC/Kg \pm DE
Patsari	1.98 \pm 0.55 ^A	0.20 \pm 0.09 ^{AB}	0.30 \pm 0.08 ^A	3.76 \pm 1.04 ^A
Ecostufa	3.26 \pm 2.78 ^A	0.26 \pm 0.20 ^{AB}	0.42 \pm 0.16 ^A	6.19 \pm 5.28 ^A
Onil	1.18 \pm 0.24 ^A	0.03 \pm 0.01 ^B	0.36 \pm 0.08 ^A	2.24 \pm 0.46 ^A
Fogón U	2.34 \pm 0.99 ^A	0.30 \pm 0.13 ^A	0.29 \pm 0.07 ^A	4.45 \pm 1.87 ^A

El número de repeticiones por dispositivo es N=5, la variabilidad se expresa como \pm (DE, desviación estándar). Las letras A y B representan la agrupación de los dispositivos con la prueba de Tukey y 95% de intervalo de confianza. Los promedios que no comparten letra son diferentes significativamente.

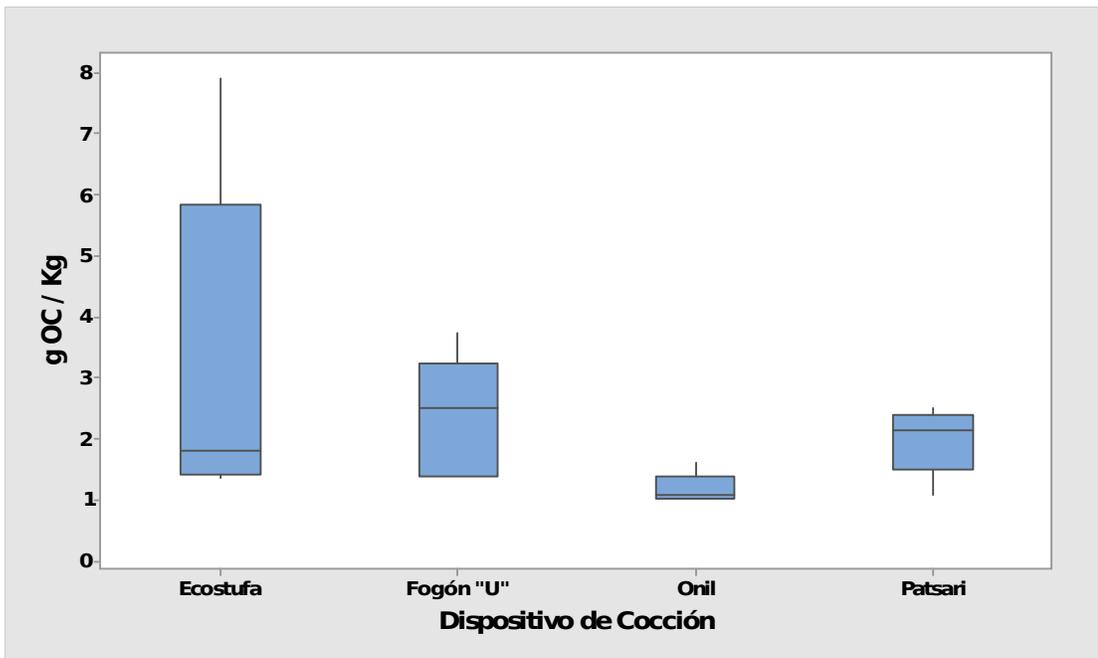


Figura 26: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Orgánico

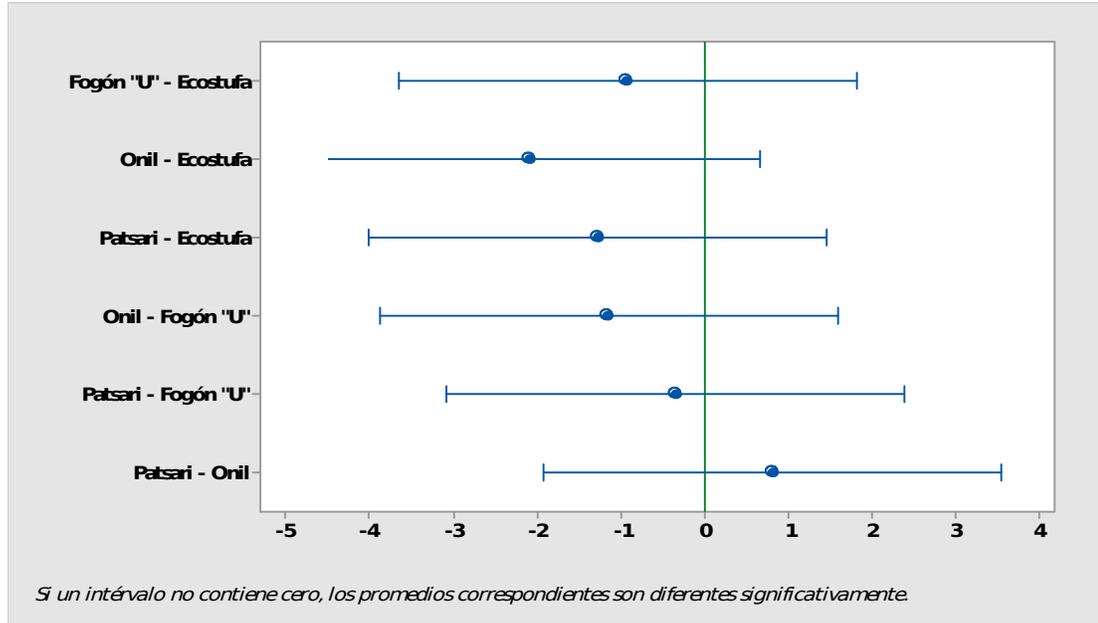


Figura 27: Resultado de la prueba de Tukey para factor de emisión de Carbono Orgánico, con 95% de intervalo de confianza.

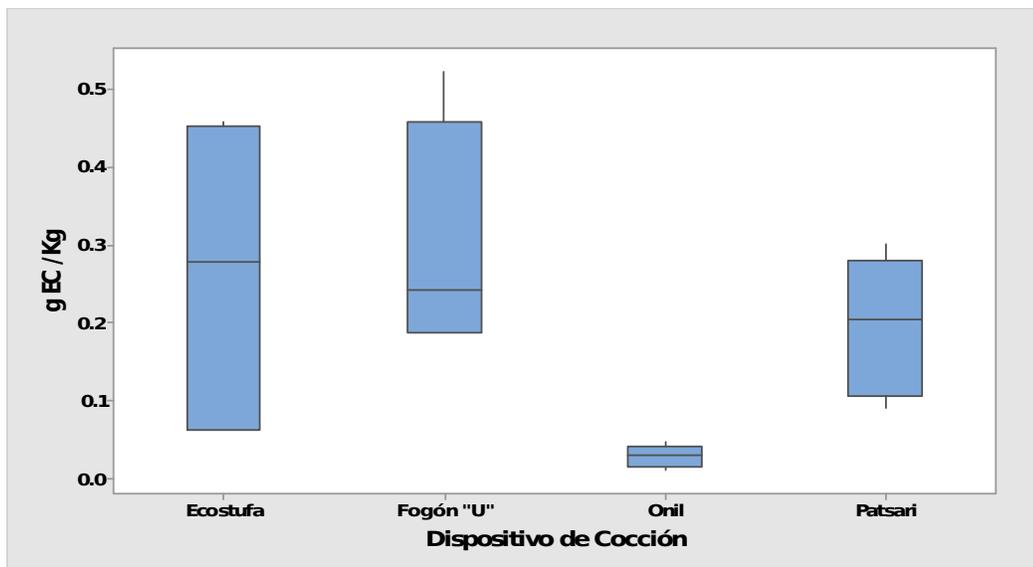


Figura 28: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Elemental

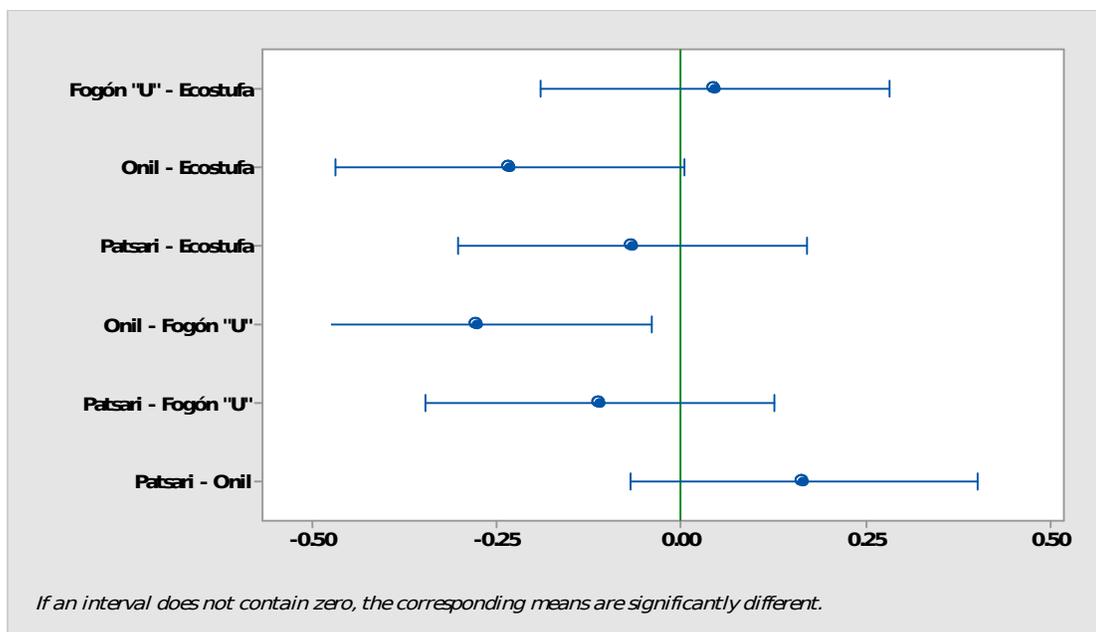


Figura 29: Resultado de prueba de Tukey para Factor de Emisión de Carbono Elemental

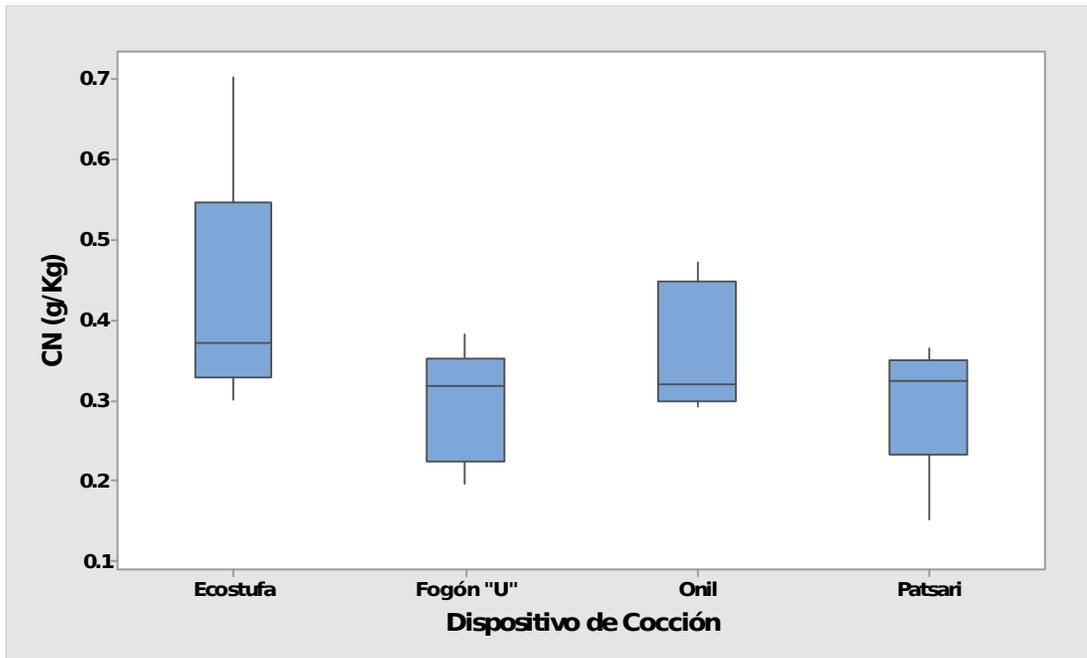


Figura 30: Diagrama de caja de factor de emisión de Carbono Negro.

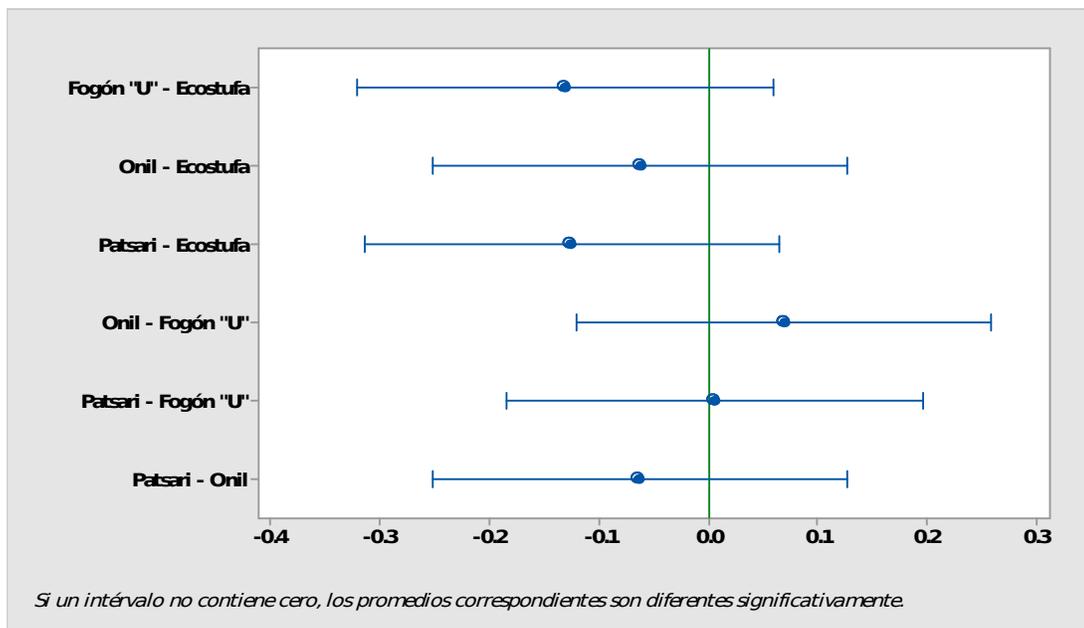


Figura 31: Resultado de la prueba Tukey para Factor de emisión de Carbono Negro

La figura 32 muestra la relación del carbono elemental con el carbono total (EC/TC), los radios encontrados son menores que los reportados para la quema abierta de biomasa, cuyos promedios rondan 0.1 [Reid et al, 2005].

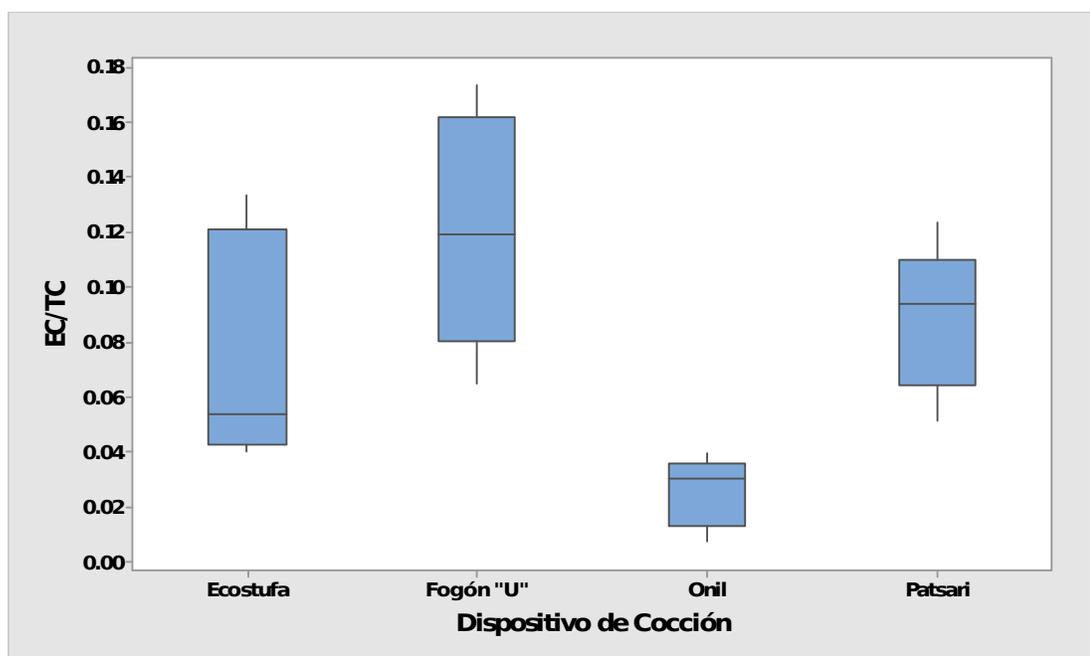


Figura 32: Diagrama de caja de la relación Carbono Elemental entre Carbono Total

4.3 Contribución de los productos de combustión en el efecto invernadero.

El efecto neto se calculó con la ecuación 3.11, con los factores de emisión de CO₂, CO, OM, EC, obtenidos de las pruebas y el factor de emisión de CH₄ para la estufa PATSARI y el Fogón tomado de Johnson [2008]; los potenciales de calentamiento se presentaron en la tabla 1, para la estufas ECOSTUFA y ONIL no se tiene el factor de emisión de CH₄. La tabla 8 muestra el efecto neto de la contribución al efecto invernadero y la figura 33 representa a los dispositivos con sus respectivas contribuciones de los productos de combustión incompleta al efecto invernadero, las siguientes gráficas 34, 35, 36 y 37 muestran la contribución individual de los contaminantes por dispositivo.

Tabla 8. Efecto neto de contribución al calentamiento y entre dispositivos.

DISPOSITIVO	CO _{2e} (g/Kg)
Patsari	397.24
Ecostufa	232.67
Onil	316.86
Fogón "U"	476.89

Tabla 17. Contribución al efecto invernadero por dispositivo y contaminante

Dispositivo de Cocción	CO ₂ g/KG±DE	CO g/KG±DE	OM g/KG±DE	EC g/KG±DE	CH ₄ g/KG±DE
PATSARI	347.2±24.38	153.6±17.57	-288.7±83.75	151.49±55.4	33.6 ± 1
ECOSTUFA	360.88±47.4	158.8±50.05	-464.6±396.3	177.6±133	N.D
ONIL	400.8±18.08	64±13.34	-167.8±34.41	19.87±9.62	N.D
FOGÓN U	307.68±24.2	118.4±17.74	-333.9±140.5	205.54±89.9	179.2 ±2.3

El número de repeticiones por dispositivo es N=5, la variabilidad se expresa como ± DE desviación estándar. N.D no determinado.

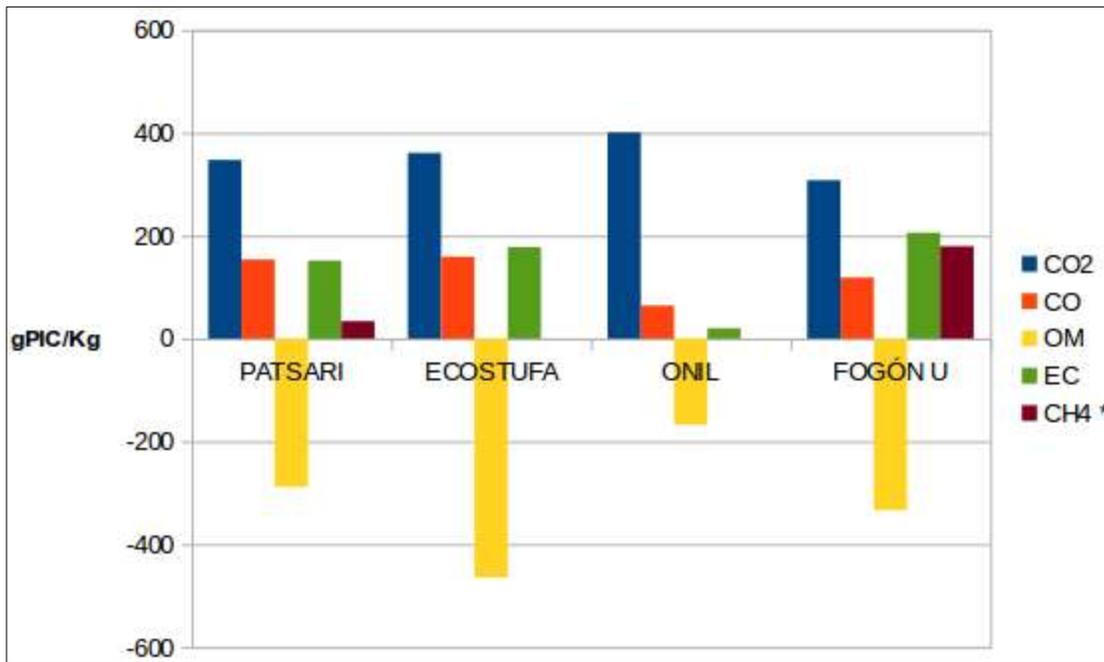


Figura 33: Contribución al efecto invernadero por dispositivo y contaminante. *El CH4 para la estufa PATSARI y el Fogón se tomó de Johnson [2008]

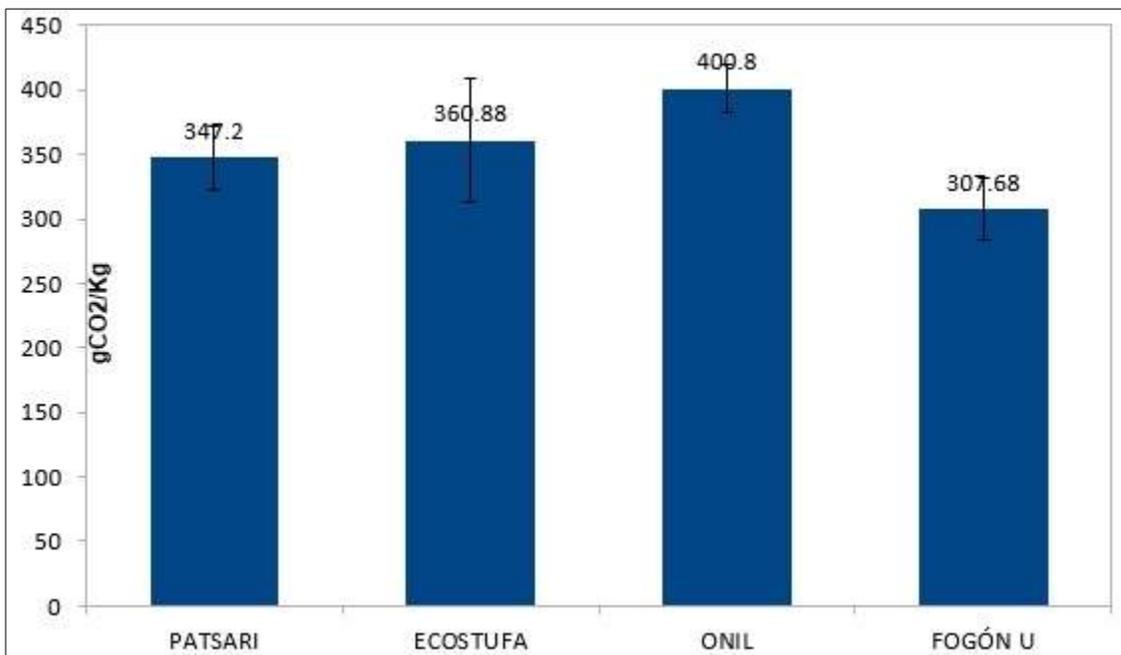


Figura 34: Comparación de la contribución al efecto invernadero de CO2 por dispositivos. Las líneas representan la desviación estándar.

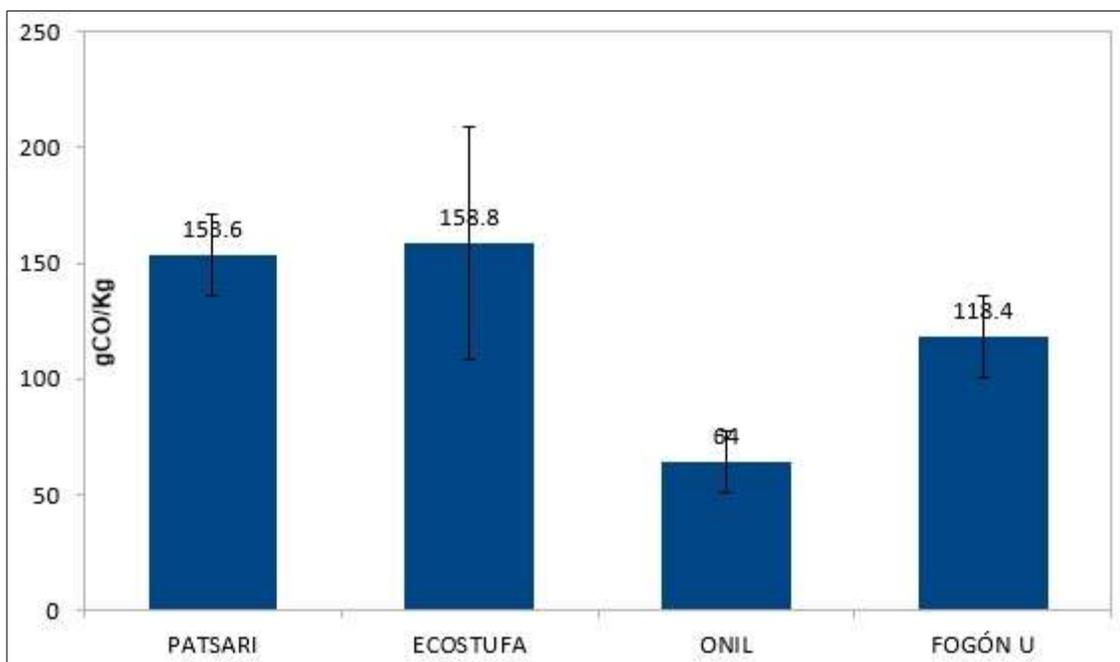


Figura 35: Comparación de la contribución al efecto invernadero de CO por dispositivos. Las líneas representan la desviación estándar.

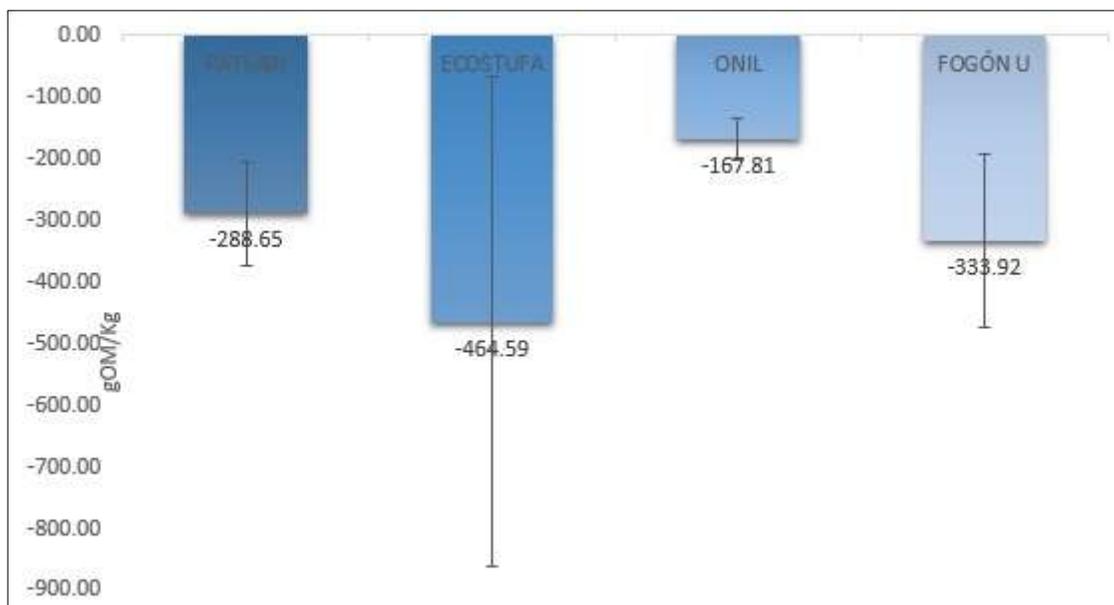


Figura 36: Comparación de la contribución al efecto invernadero de Materia Orgánica por dispositivos. Las líneas representan la desviación estándar

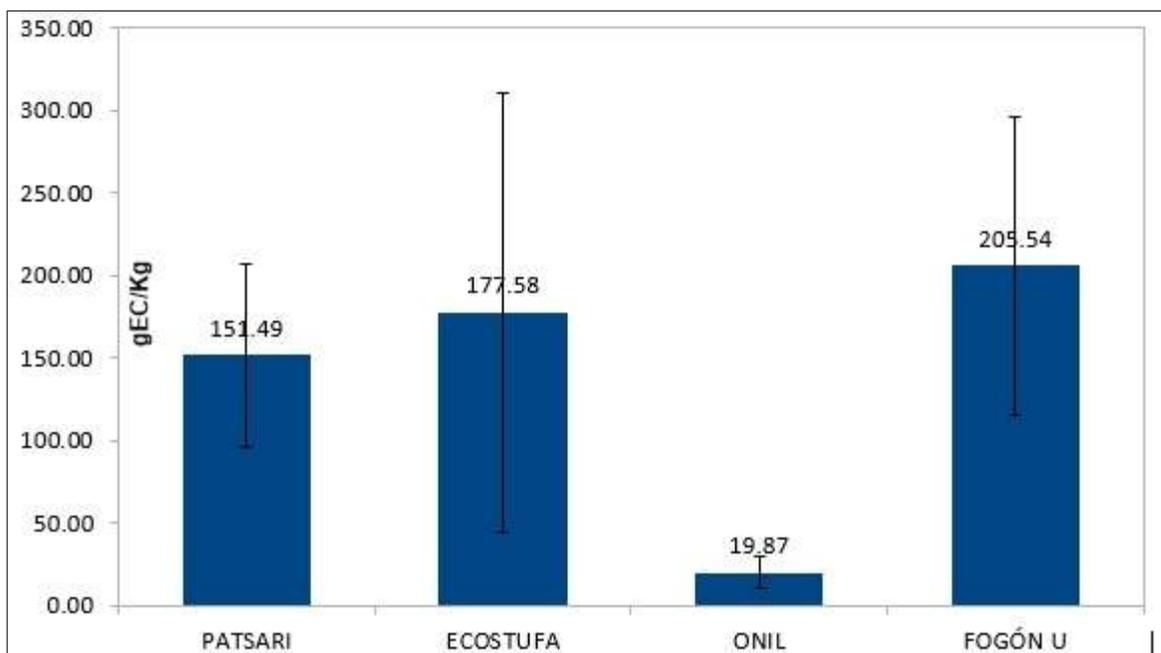


Figura 37: Comparación del Carbono Elemental en la contribución al efecto invernadero, por dispositivo. Las líneas representan la desviación estándar.

CONCLUSIONES

Las estufas mejoradas más diseminadas por el territorio mexicano son : PATSARI, ECOSTUFA Y ONIL, aunque el fogón tradicional ya sea tipo U o tres piedras sigue predominando en los hogares que utilizan la leña como combustible.

La cabaña simulada es una excelente manera de realizar las pruebas de cocinado, contando con las características típicas de las cocinas de la región se puede recrear un ambiente semejante al del domicilio particular sin los inconvenientes que se generan como la invasión con tuberías y equipos de medición muchas veces ruidosos, además al ser hogares con tradiciones muy conservadoras muchas veces no es bien visto que la señora esté sola en su casa con los evaluadores; por otro lado al hacer las pruebas en el laboratorio las señoras se sienten cohibidas y no se desenvuelven con la naturalidad que les da un ambiente conocido, por lo que una cocina simulada tiene muchas ventajas tanto para la cocinera como para los evaluadores. El diseño de doble campana ayuda a capturar las emisiones de chimenea e intramuros por separado, aunque en el presente trabajo se reportan juntas como emisiones totales se pudo conocer que las emisiones intramuros no pasan del 5% para las estufas mejoradas, lo que es mucho menos que el 25% que se estimaba anteriormente, comprobando que dichas estufas ayudan a mantener la salud de los usuarios, como lo reporta Vázquez [2017].

Las pruebas de laboratorio se considera que no son representativas de lo que realmente sucede en los hogares, y la prueba KPT no tiene buena repetibilidad, por lo tanto una prueba de ciclo de cocinado es una buena opción para cerrar la brecha entre campo y laboratorio como menciona Medina [2017b].

La variable “cocinero” es muy importante ya que se han encontrado diferencias en los resultados entre cocineras usando una misma estufa y realizando la misma prueba, pues dependiendo de cómo es atendido el fuego ya sea humeante o de flama, tiene efecto en el tipo de partículas que se producen. En este caso el consumo de leña y el tiempo de cocinado fue muy semejante entre los dispositivos evaluados, encontrando

diferencia significativa sólo entre la estufa ONIL con el Fogón “U” y la estufa PATSARI para el consumo de leña.

Se encontró diferencia significativa entre los factores de emisión de Carbono Elemental de la estufa ONIL (0.03 ± 0.01 gC/Kg) y el Fogón “U” (0.30 ± 0.13 gC/Kg), los factores de emisión de Carbono Orgánico y Carbono Negro no presentaron diferencias significativas según la prueba de Tukey con 95% de confianza .

La diferencia entre Carbono Elemental y Carbono Negro depende del método de análisis, donde el método óptico arroja valores más altos en general que el termo-óptico, la correlación entre estas dos formas de determinar el carbono no fue satisfactoria por la poca cantidad de datos experimentales obtenidos, que fueron 24 contra los cientos que se encuentran en la literatura. De la experiencia se recomienda el uso de un método termo-óptico por ser más robusto, por lo cual para el análisis de contribución al efecto invernadero se usaron los datos de EC.

El Fogón “U” presenta una emisión de OM (la fracción enfriante del aerosol) mayor que la de las estufas mejoradas, pero su contribución en CO, CO₂, EC y CH₄ hace que el balance sea de calentamiento y su CO_{2e} sea mayor, un 20% más que la estufa PATSARI.

BIBLIOGRAFIA

- Afonso J.; Pio C.; Oliveira T. 2004, “*Avaliação da determinação de carbono orgânico e carbono negro por um método termo óptico*”. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DO AMBIENTE, 8., 2004, Lisboa, Portugal. Actas... Lisboa: [s.n].
- Aguirre-Calderon y Jimenéz-Pérez, 2011, Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León, *Rev. Mex. Cien. For.* Vol. 2 Núm. 6
- Andreae M. Gelencsér A., 2003, Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3131–3148, 2006
- Anglés M., Roux R. y García E. 2017. Reforma en materia de hidrocarburos. Análisis jurídicos, sociales y ambientales en prospectiva. Segunda parte, capítulo segundo. Ed. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS. México.
- 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 improve cookstoves using controlled cooking test, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 3958-3965.
- Bahadur R., Praveen P., Xu Y., Ramanathan V., 2012, Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109 (43) 17366-17371
- Bhattacharya, S.C., Albina, D.O., Khaing, A.M., 2002. Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. *Biomass and Bioenergy* 23, 387–395
- Beyene A., Bluffstone R., Gebreegziaber Z., Martinsson P., Mekonnen A., 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*.
- Birch M. and Cary R., 1996, Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposure to Particulate Diesel Exhaust; *Aerosol Science and Technology*, 25:221-241

- Bond, T.C. y Sun H., 2005, Can reducing black carbon emissions counteract global warming?, *Environmental Science and Technology*, 39 (16) 5921-5926
- Bond, T.C., Bhardwaj, E., Dong, R., Jogani, R., Jung, S., Roden, C., Streets, D.G., Trautmann, N.M., 2007. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000. *Global Biogeochemical Cycles* 21, GB2018. doi:10.1029/2006GB002840.
- Bond T., Doherty S., Fahey D., Forster P., Berntsen T., De Angelo B., Flanner M., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P., Sarofim M. Schultz M., Schulz M., Venkataraman., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S., Hopke P., Jacobson M., Kaiser J., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J., Shindell D., Storelymo T., Warren S., Zender C., 2013 Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *American Geophysical Union*
- CCA (2015), Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: métodos recomendados, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 105 pp.
- Chung, S. Seinfeld, J., 2002, Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 107, 4407, doi:10.1029/2001JD001397
- Chung, S. H. and Seinfeld, J. H., 2005, Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon, *Journal of Geophysical Research*, 110, D11102, doi:10.1029/2004JD005441.
- Díaz, R.; Masera, O.; 2003; "Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades," Secretaría de Energía,.
- DIF Veracruz, 2014, Dictamen que determina la procedencia de adquirir estufas ecológicas, mediante el procedimiento de adjudicación directa, que serán destinadas, a la población de escasos recursos localizada en el municipio de Tehuipango, Veracruz.
- Fundar, Centro de Análisis e Investigación, A.C. 2017. Las actividades extractivas en México: Estado actual. Anuario 2016. México
- García-Frapolli E., Schilman A., Berrueta V.M., Riojas-Rodríguez H., Edwards R.D., Johnson M., Guevara-Sanginés A., Armendariz C., Masera O., 2010, Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico, *Ecological Economics* 69, 2598

- Ghilardi, A., Guerrero, G., Masera, O., 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass and Bioenergy* 31, 475–491.
- GIRA, 2003, El uso de biomasa como fuente de energía en los hogares , efectos en el ambiente y la salud y posibles soluciones. Informe final. http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/inf_gira_estufas.pdf
- Hansen, A.D.A., 2005. The Aethalometer TM. Magee Scientific, Berkeley, California, US.
- IPCC, 2013, Cambio climático 2013, bases físicas. Resumen para los responsables de políticas, Resumen técnico y preguntas frecuentes. Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K., Sherwood, S., Stevens, B., Zhang, X.Y., 2013. Clouds and aerosols. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Jacobson, M.Z., 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature* 409 (6821), 695e6
- Jacobson, M.Z., 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 106, 1551–1568.
- Jacobson, M. Z. 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming, *J. Geophys. Res.*, 107, 4410, doi:10.1029/2001JD001376.
- Jetter J., Kariher P., 2008. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions, *biomass and bioenergy* 33 (2009) 294–305.
- Jetter J., Zhao Y., Smith K., Khan B., Yelverton T., DeCarlo P., Hays M., 2012, Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards , *Environmental Science & Technology*.

- Johnson M., Edwards R., Alatorre Frenk C., Masera O., 2008 In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment* 42 1206–1222
- Johnson M., Edwards R., Berrueta V., Masera O., 2010 New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environmental Science & Technology* 44,368-374
- Jones, G. S., Jones, A., Roberts, D. L., Stott, P. A., and Williams, K. D., 2005, Sensitivity of global-scale climate change attribution results to inclusion of fossil fuel black carbon aerosol, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14701, doi:10.1029/2005GL023370
- Kshirsagar M., Kalamkar V., 2014 A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove desing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 580-603
- Kuhlbusch T. 1998. Black Carbon and the Carbon Cycle. *SCIENCE*. Vol 280
- L'Orange C., Volckens J., DeFoort M., 2012, “Influence of stove type and cooking pot temperature on particulate matter emissions from biomass cook stoves”. *Energy for Sustainable Development* 16 448–455
- MacCarty N., Still D., Ogle D., Drouin T., 2008-a, 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 emission, and indoor air pollution, Aprovecho Research Center.
- MacCarty N., Ogle D., Still D., Bond T., Roden C., 2008-b, A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves, *Energy for Sustainable Development*, 12, 5-14
- Masera O., Díaz R., Berrueta V., 2004 Programa para el uso sustentable de la leña en México: de la construcción de estufas a la apropiación de tecnología.
- Masera, O. 2010. “Mitigation Carbon Emissions while Advancing Sustainable Development Goals: Small-Scale Bioenergy Systems”. Cambridge University Press
- Masiello C.A., 2004, New directions in black carbon organic geochemistry, *Marine Chemistry*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.043>

- Medina P., Berrueta V., Martínez M., Ruiz V., Edwards R.D., Masera O., 2016, “Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests”. *Development Engineering*
- Medina Mendoza Paulo César, 2017a, Tesis para obtener el grado de Doctor: “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” UMSNH.
- Medina P., Berrueta V., Martínez M., Ruiz V., Ruiz I., Masera O., 2017b, Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles. *Energy for Sustainable Development*.
- Molina Esquivel M., Martínez Varona M., Turtós Carbonell L., 2015, “Carbono elemental y orgánico en PM2.5 y PM10 de zonas urbanas de La Habana (Cuba)” *Hig. Sanid. Ambient.* 15 (3): 1343-1349
- Morales W., Sequeira A., Chamorro E., Braga M., Sobral A., De Sousa E., Termogravimetría y Espectroscopia de infrarojo para el control del rendimiento en la obtención de Alquil Esteres, *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica-claves para el desarrollo*, volumen 2
- NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
- Ortíz J., Masera O., Fuentes A., 2014, “La ecotecnología en México”, *Unidad de ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelia*.
- Oswald Úrsula. 2017. Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*. Volumen 62, 155-195
- Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J. T., Washington, W. M., Fu, Q., Sikka, D. R., and Wild, M., 2005, Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 102, 5326–5333
- Ramanathan N., Lukac M., Ahmed T., Kar A., Praveen P.S., Honles T., Leong I., Rehman I.H., Schauer J.J., Ramanathan V., 2011, “A cellphone based system for large-scale monitoring of black carbon” *.Atmospheric Environment*

Reid, J., Eck, T., Christopher, S., Koppmann, R., Dubovik, O., Eleuterio, D., Holben, B., Reid, E., Zhang, J. 2005. A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 827-849.

REMBIO, 2011, Estufas de leña, *Cuaderno Temático 3*

REMBIO, 2011, La bioenergía en México, situación actual y perspectivas, *Cuaderno Temático 4*

Ruiz-Mercado I., Masera O., 2015, "Patterns of stove use in the context of fuel-device stacking: rationale and implications", *EcoHealth* 12, 42-56

Saleh R., Robinson E., Tkacik D., Ahern A., Liu S., Aiken A., Sullivan R., Presto A., Dubey M., Yokelson R., et al., 2014, Brownness of organics in aerosol from biomass burning linked to their black carbon content. *Nat Geosci.* 7(9), 647-650.

Seinfeld, J. & Pandis, S., 1998: *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Smith, K.R., Khalil, M.A.K., Rasmussen, R.A., Thorneloe, S.A., Manegdeg, F., Apte, M., 1993. Greenhouse gases from biomass and fossil fuel stoves in developing countries: a manila pilot study. *Chemosphere* 26, 479– 505

Smith, K.R., Uma, R., Kishore, V.V.N., Lata, K., Joshi, V., Zhang, J., Rasmussen, R.A., Khalil, M.A.K., 2000a. Green- house Gases from Small-scale Combustion Devices in Developing Countries. United States Environmental Protection Agency, Washington DC (EPA/600/R-00/052).

Schmidt M., Skjemstad J., Czimczik C., Glaser B., Prentice K., Gelinás Y., Kuhlbusch T., 2001. Comparative analysis of black carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles* 15: 163-167 DOI: 10.1029/2000GB001284

Vázquez Tinoco Juan Carlos, 2017, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental: "Determinación de las emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes CO y PM_{2.5} por el uso de la estufa PATSARI, mediante la prueba de ebullición de agua WBT". UMSNH.

Wathore R., Mortimer K., Grieshop A., "In use emissions and estimate impacts of traditional, natural-and forced-draft cookstoves in rural Malawi", *Environmental Science & Technology*

Zanatta M., Gysel M., Bukowiecki N., Müller T., Weingartner E., Areskoug H., Fiebig M., Yttri K.E., Mihalopoulos N., Kouvarakis G., Beddows D., Harrison R.M., Cavalli F., Putaud J.P., Spindler G., Wiedensohler A., Alastuey A., Pandolfi M., Sellegri K., Swietlicki E., Jaffrezo J.L., Baltensperger U., Laj P., 2016, "A European aerosol phenomenology-5: Climatology of black carbon optical properties at 9 regional background sites across Europe" *Atmospheric Environment* 145, 346-364

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

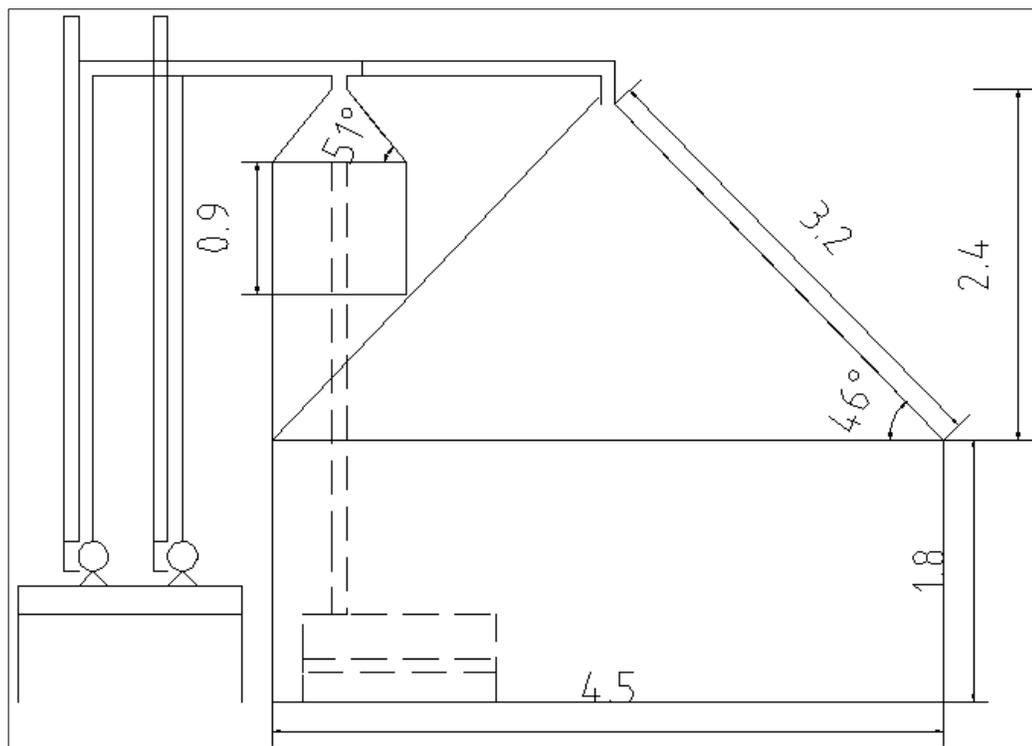
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion3.pdf> junio 2016

<http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html> julio 2016

Anexo A

Construcción de cabaña simulada

El volumen promedio de las cocinas de la región purhépecha de Michoacán es de 41 m³, por lo que las dimensiones de la cabaña simulada son: 4.5X3.5X4.2 metros.



Dibujo 1: Cabaña simulada y tren de muestreo

La evolución en la construcción de la cabaña se muestra en las figuras 38 y 39



Figura 38: Inicio de construcción de cabaña



Figura 39: Construcción del techo de la cabaña

La campana para chimenea tiene una estructura de metal forrada con lámina galvanizada, con las medidas 0.9 X 0.8 X 1.5 metros, y va colocada sobre el techo de la cabaña como se muestra en la figura 40.



Figura 40: Cabaña terminada con campana para chimenea

El techo hace la función de campana para las emisiones intramuros, por lo que se le colocó lamina galvanizada y se sellaron las uniones con cinta metálica, como se aprecia en la figura 41.



Figura 41: Techo en forma de campana

Después se colocó la parte superior de los trenes de muestreo, dejando la toma de muestra y extractores para ponerse sólo los días de prueba. Ya que quedan al descubierto, para protegerlos equipos de la lluvia, como se muestra en la figura 42.



Figura 42: Cabaña con tren superior de muestreo

En la figura 43 se muestra la cabaña terminada, durante una prueba de ciclo de cocinado CBC



Figura 43: Cabaña terminada, durante una prueba CBC