



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

EVALUACIÓN DEL PERFIL DE EMISIONES DE UN
MICROGASIFICADOR A BASE DE PELLETS PARA
SATISFACER LA TAREA DE REALIZAR TORTILLAS DE
COMAL EN EL CONTEXTO MEXICANO: RETOS,
LIMITANTES Y BENEFICIOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

RODRIGO ALEJANDRO ARRIAGA SUÁREZ

DIRECTOR(A) DE TESIS: Dr. Ricardo Musule Lagunes

CODIRECTOR(A) DE TESIS: Dr. Victor Manuel Ruíz García



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

MORELIA, MICHOACÁN

OCTUBRE, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **30 de agosto del 2021**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Rodrigo Alejandro Arriaga Suárez** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **417102238**, con el trabajo titulado: **"Evaluación del perfil de emisiones de un microgasificador a base de pellets para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal en el contexto mexicano: retos, limitantes y beneficios"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Ricardo Musule Lagunes y como **co-tutor** el Dr. Víctor Manuel Ruíz García.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Carlos Alberto García Bustamante
Vocal: Dra. Montserrat Serrano Medrano
Secretario: Dr. Víctor Manuel Ruíz García
Suplente: Dra. Esperanza Arnés Prieto
Suplente: Mtro. Jorge Emigdio Sánchez Pólito

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 10 de noviembre de 2021.

DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (ENES MORELIA), a la Licenciatura de Ciencias Ambientales (LCA) y al Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación de Energía Térmica y Eléctrica, Secretaría de Energía (SENER)-CONACyT2014 No. 246911 por los recursos económicos brindados para la elaboración de este trabajo de tesis y a las instituciones por ser mi casa durante estos años de licenciatura y ser la institución que me ha brindado herramientas y experiencias que estoy seguro serán un pilar importante en mi vida profesional, por ser también mi hogar, donde he conocido personas increíbles y me ha permitido disfrutar del ámbito académico y social.

Al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB), que me ofreció el espacio de trabajo, con las medidas necesarias y el equipo profesional y adecuado para la realización de este trabajo de tesis.

A mis tutores Ricardo Musule Lagunes y Víctor Manuel Ruíz García quienes me han apoyado en cada instante de mi elaboración de tesis, de quienes he aprendido bastante y son un ejemplo a seguir.

A los técnicos del Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB), Juan Carlos Vázquez Tinoco, Saraí Ramos Vargas, Dante Samuel Villanueva Peralta, los cuales me apoyaron durante mi experimentación y me enseñaron cosas fundamentales para mi trabajo.

A mis sinodales, el Dr. Carlos García Bustamante, la Dra. Monserrat Serrano Medrano, el Dr. Víctor Manuel Ruíz García, la Dra. Esperanza Arnés Prieto y el

Mtro. Jorge Emigdio Sánchez Pólito, quienes tuvieron la amabilidad y compromiso de aceptar ser parte de mi jurado.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis padres, Ma. Celina Suárez Boyzo y Rodrigo Arriaga Rendón, quienes me han educado y apoyado en todo a lo largo de mi vida y me han enseñado a persistir y luchar por lo que quiero.

A mi hermano, Cristian Antonio Arriaga Álvarez, quien me ha alentado a estudiar y a trabajar, y me ha enseñado a no darse por vencido y trabajar siempre con alegría y motivación.

A mi novia, Ruth Martínez Tinoco, quien a lo largo de estos 7 años me ha apoyado en cualquier situación, me ha brindado su amor y cariño, y con quien he ido aprendiendo a vivir la vida, a crecer y a saber vivirla.

A mis compañeros y amigos de la universidad, especialmente a Alan Ortega, Tziraat Molina, Ángel Sánchez, Brayan Manzo, Marlon Gómez, Ulises Álvarez, Juan Martínez, José del Río, con quienes he pasado momentos inolvidables y quienes me han hecho pasar por la etapa más bonita, divertida, formativa y productiva de mi vida.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES	3
AGRADECIMIENTOS PERSONALES	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
GLOSARIO	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivo general	18
1.4 Objetivos particulares	18
1.5 Preguntas de investigación	19
1.6 Hipótesis	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.1.1. Propiedades fisicoquímicas de las biomasas y los pellets.	20
2.1.2. Tipos de microgasificadores, características y beneficios asociados.	23
2.1.3. Uso de microgasificadores alimentados por biomasa.	26
2.1.4. Uso de microgasificadores alimentados con pellets en el sector residencial.	28
2.1.5. Análisis del perfil de emisiones del uso de microgasificadores de biomasa	31
2.1.6. Evaluaciones de los dispositivos empleados para la producción de tortillas a escala residencial en México.	35
2.1.7. Pobreza energética y situación contemporánea por COVID-19	37
3. METODOLOGÍA	40
3.1 Descripción del microgasificador evaluado	40
3.2 Descripción y caracterización fisicoquímica de los combustibles	42
3.3.1. Determinación de humedad	43
3.3.2. Determinación de cenizas	44
3.3.3. Determinación de materia volátil.	45
3.3.5. Determinación de poder calorífico	47
3.3.6. Determinación de Carbono fijo	47
3.4. Desempeño energético	48
3.3. Medición de emisiones resultantes de la combustión	51

3.4 Efectos netos de contribución al efecto invernadero.....	55
3.5. Diseño de experimento y análisis estadístico.	58
4. RESULTADOS	59
5. CONCLUSIONES	71
RETOS, LIMITANTES Y BENEFICIOS.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS	75
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores estándares por la norma europea EN 14961-2 para el uso de pellets de residuos forestales de uso no industrial	19
Tabla 2. Emisiones de intramuros máximas permisibles de CO y PM _{2.5} derivadas de la combustión de combustibles domésticos con ventilación y sin ventilación	28
Tabla 3. Factores de emisiones predeterminados, tasas, concentraciones equivalentes y % de hogares que cumplen los criterios especificados para PM _{2.5}	29
Tabla 4. Factores de emisión predeterminados, tasas, concentraciones equivalentes y % de hogares que cumplen los criterios especificados para CO	29
Tabla 5. Emisiones y características de algunos microgasificadores de biomasa comerciales	31
Tabla 6. Especificaciones físicas del microgasificador TLUD-Atzimba A10 XL	39
Tabla 7. Cantidades y proporciones de los parámetros por la utilización de cada tipo de pellet en la prueba de cocinado	47
Tabla 8. Valores de potencial de calentamiento global	53
Tabla 9. Análisis proximal de los pellets utilizados	56
Tabla 10. Poder calorífico superior y poder calorífico inferior de los pellets	57
Tabla 11. Parámetros de desempeño energético del microgasificador	58
Tabla 12. Factores de emisión por masa de alimento preparado	60
Tabla 13. Tasas de emisión totales	61
Tabla 14. Factores de emisión por energía liberada de combustible	62
Tabla 15. Factores de emisión de CO _{2eq} por Kg de tortilla preparada	64
Tabla 16. Factores de emisión de CO _{2eq} por Kg de pellet consumido	64
Tabla 17. Contribución al efecto invernadero por consumo eléctrico	67
Tabla 18. Tasas de emisión de CO _{2eq} (g/min). (Se toma en cuenta el CO ₂ y un factor de no renovabilidad de la biomasa (fnrb))	90
Tabla 19. Tasas de emisión de CO _{2eq} (g/min). (No se toma en cuenta el CO ₂)	90
Tabla 20. Factores de emisión de CO _{2eq} por kg de pellet consumido (g/kg). (Se toma en cuenta el CO ₂ y un fnrb)	91
Tabla 21. Factores de emisión de CO _{2eq} por kg de pellet consumido (g/kg). (Se toma en cuenta el CO ₂ y un fnrb sólo para el pellet de pino)	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gasificadores de lecho fijo	20
Figura 2. Diagrama de un gasificador de lecho fluidizado	21
Figura 3. Ejemplos de microgasificadores	23
Figura 4. Necesidades básicas humanas	24
Figura 5. Estufas microgasificadoras comerciales	27
Figura 6. Estufas de cocción empleadas en el trabajo de Blanco et al (2012)	32
Figura 7. Microgasificador de biomasa TLUD-Atzimba A10 XL	38
Figura 8. Pellets empleados en este estudio	39
Figura 9. Residuos de muestra en la determinación de la materia volátil	43
Figura 10. Diseño de las pruebas piloto	46
Figura 11. Pruebas de cocinado	48
Figura 12. Representación del sistema de la campana para la separación y captura de las emisiones intramuros	51
Figura 13. Tren de muestreo de emisiones totales	52
Figura 14. Medias y desviación típica de CO_{2eq}	65
Figura 15. Comparación de emisiones de CO_{2eq} entre el microgasificador evaluado, estufas eficientes de leña y fogón de 3 piedras	66
Figura 16. Velocicalc	81
Figura 17. Q-TRACK	82
Figura 18. TESTO	82
Figura 19. Sistema Gravimétrico PEMS	83
Figura 20. Bombas de succión	83
Figura 21. Medidor de flujo	84
Figura 22. Wattmetro	84
Figura 23. Cromatógrafo	85
Figura 24. Horno de secado esmaltado digital	85
Figura 25. Desecador hermético	86

Figura 26. Mufla	86
Figura 27. Almacén de filtros	87
Figura 28. Bascula semi micro-analítica	87
Figura 29. Kit de masas estándar	88
Figura 30. Filtros de fibra de vidrio y de cuarzo	88
Figura 31. Desionizador	89
Figura 32. Termómetro digital de contacto	89
Figura 33. Calorímetro	89

GLOSARIO

Biocombustible: Se refiere a aquel combustible procedente de la biomasa, el cual tiene fines energéticos.

Biomasa: Es toda materia orgánica, por ejemplo, la leña, residuos orgánicos, de cultivos, forestales, estiércol, entre otros.

Emisiones intramuros: Son aquellas emisiones que permanecen dentro del espacio donde se encuentran los usuarios de las tecnologías (habitación y cocina principalmente).

Gasificación: Es un proceso termoquímico donde la biomasa sólida que entra en una cámara de combustión se convierte en un gas combustible.

Microgasificador de biomasa: Es una tecnología que gasifica la materia orgánica para fines energéticos. El término micro viene de tecnologías que operan a bajas potencias (5-10 kW).

Mitigación: Se refiere a todas aquellas emisiones que no se emiten a la atmósfera por la sustitución de un dispositivo, combustible y/o cambios de hábitos en el consumo de energía.

Pellets de biomasa: Son aquellos biocombustibles sólidos procesados, procedentes principalmente de residuos forestales o agrícolas utilizados para satisfacer necesidades energéticas.

Perfil de emisiones: Es la gama de productos de la combustión de los combustibles. Entre los más comunes se encuentran las emisiones de CO, CO₂, CH₄, H₂, HCN, PM_{2.5}, entre otros.

RESUMEN

Derivado del aumento en la demanda por el uso y quema de combustibles fósiles en los últimos años en nuestro planeta, se ha optado por utilizar fuentes de energía renovable y tecnologías más amigables con el medio ambiente. Los biocombustibles, especialmente los pellets de biomasa han sido utilizados como un medio de producción de calor, sustituyendo de este modo a los combustibles convencionales como la leña y el carbón en las tareas de cocción domésticas.

Los microgasificadores de biomasa son un tipo de tecnología relativamente nueva que satisfacen tareas de cocción de alimentos con el fin de poder utilizar biocombustibles sólidos y reducir el impacto ambiental gracias a su sistema de gasificación, el cual permite una combustión más limpia de la biomasa.

En México la tortilla representa un icono cultural y es un elemento muy importante en la dieta de los mexicanos.

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar un microgasificador que funciona a base de pellets para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal en el contexto mexicano y así mismo identificar retos, limitantes y beneficios.

Se realizó una caracterización fisicoquímica (análisis proximal) de los pellets a utilizar (agave, café y pino) con base en las normas internacionales y algunas adecuaciones del Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB).

Así mismo mediante unas pruebas de cocción de alimentos con tortillas de comal se determinó el desempeño energético del microgasificador y se calcularon los gases de efecto invernadero para poder comparar los valores con dispositivos y combustibles tradicionales e identificar si existe mitigación asociada.

Los resultados de la caracterización muestran valores aprobables para una buena calidad del pellet para usos no industriales, mientras que, derivado del desempeño energético del microgasificador se determinó que indistintamente del tipo de pellet empleado en este estudio se puede lograr el mismo comportamiento energético, suficiente para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal.

Se encontraron diferencias significativas con relación a las emisiones generadas por cada tipo de pellet en el microgasificador; los pellets agrícolas (agave y café) obtuvieron los valores más altos en cuanto a CO y PM_{2.5}, además de que tienen un impacto mayor en el medio ambiente que el pellet forestal (pino) por su huella de carbono (CO₂eq). A pesar de ello se encontró una mitigación asociada de hasta 613 gCO₂eq/kg de combustible por el uso de pellets agroforestales en un microgasificador en comparación con un fogón tradicional de leña.

ABSTRACT

Derived from the increase in demand for the use and burning of fossil fuels in recent years on our planet, it has been necessary to use renewable energy sources and more environmentally friendly technologies. Biofuels, especially biomass pellets, have been used as a means of producing heat, replacing conventional fuels such as firewood and charcoal in domestic cooking tasks.

Biomass microgasifiers are a relatively new type of technology that satisfy food cooking tasks to be able to use solid biofuels and reduce environmental impact due to their gasification system, which allows a cleaner combustion of biomass.

In Mexico, the tortilla represents a cultural icon and is a very important element in the Mexican diet.

The objective of this work is to evaluate a microgasifier that works with pellets to satisfy the task of making comal tortillas in the Mexican context and to identify challenges, limitations, and benefits.

A physicochemical characterization (proximal analysis) of the pellets to be used (agave, coffee and pine) was carried out based on international standards and some adjustments of the Biomass Evaluation and Innovation Laboratory (LINEB).

Through food cooking tests with comal tortillas, the energy performance of the microgasifier was determined and the greenhouse gases were calculated to be able to compare the values with traditional devices and fuels and identify if there is associated mitigation.

The results of the characterization show approvable values for a good quality of the pellet for non-industrial uses, while, derived from the energy performance of the microgasifier, it was determined that regardless of the type of pellet used in this study, the same energy behavior can be achieved, enough to satisfy the task of making comal tortillas.

Significant differences were found in relation to the emissions generated by each type of pellet in the microgasifier; agricultural pellets (agave and coffee) obtained the highest values in terms of CO and PM_{2.5}, in addition to having a greater impact on the environment than forest pellets (pine) due to their carbon footprint (CO₂eq). Despite this, an associated mitigation of up to 613 gCO₂eq / kg of fuel was found using agroforestry pellets in a microgasifier compared to a traditional wood stove.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Desde la revolución industrial los combustibles fósiles han dominado la generación de energía en todo el mundo, con el propósito de satisfacer y facilitar las necesidades y tareas del ser humano mediante la generación y aprovechamiento de energías secundarias como la térmica o la eléctrica (Schramski, Gattie, & Brown, 2015).

El aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) derivado del uso de combustibles fósiles, ha traído consigo consecuencias negativas para el entorno natural, ya que impacta a ecosistemas acuáticos, terrestres y aéreos (Torjada, et al., 2001). La generación de las emisiones de GEI provocadas por la combustión de estos vectores energéticos, principalmente de CO₂ han venido en aumento debido a su amplia demanda, sobreexplotación y dependencia energética a lo largo del planeta; este aumento en el crecimiento de GEI a nivel mundial se ha reflejado de manera notable desde el siglo XX (Castro, 2011), lo que a su vez se vincula con otras problemáticas contemporáneas como son: el incremento de la temperatura global del planeta (Cruz & Martínez, 2015), la mayor incidencia de las enfermedades respiratorias (Hernández-Flores et al., 2013), el aumento en tasas de deforestación (Martín, 2008) y la pérdida acelerada de biodiversidad por mencionar algunas.

Con base en lo anterior, se presenta el desafío de optar y realizar la transición hacia fuentes de energías más limpias, renovables y que por ende sean más amigables con el ambiente, de tal forma que nos permitan satisfacer las necesidades energéticas de la población actual (producción de calor y electricidad entre otras).

Una de las alternativas a los combustibles convencionales que se presenta en esta investigación es la bioenergía, pues además de contribuir en la mitigación de emisiones de GEI, favorece la apertura de nuevos mercados con potencial en la generación de empleos y a la reactivación de la economía tanto a nivel local y nacional (De Lira et al., s.f). La bioenergía, entendida como aquella energía obtenida de la biomasa (Mäsera et al., 2011), es la fuente de energía que más

aporta a la demanda de energía renovable. Actualmente, representa el 12% de la demanda global de energía utilizada a nivel mundial (*REN₂₁, 2020*).

Se estima, que alrededor del 77% del consumo total de biomasa se da en los usos tradicionales para cocción de alimentos y calefacción (sector residencial), en países en vías de desarrollo que comúnmente la utilizan en forma de leña y carbón vegetal. Por otra parte, los usos modernos de la bioenergía, por ejemplo, los biocombustibles líquidos para el sector transporte (biodiesel y bioetanol) y la generación eléctrica y de calor dentro de procesos industriales, consumen alrededor del 23% del consumo de biomasa (*Chum et al., 2011*).

La bioenergía presenta ciertas ventajas tanto sociales, económicas y ambientales, ésta se caracteriza por ser una alternativa a los combustibles fósiles, cuenta con la capacidad de ser almacenable, se puede producir y utilizar de manera local y regional tanto a pequeña como a gran escala, puede mitigar GEI, así como diversificar las economías rurales y promover la creación de empleos a partir de la cadena de producción (*García, et al., 2013*).

Dentro de la bioenergía, los biocombustibles son los productos resultantes de las adecuaciones y transformaciones de la biomasa, estos pueden ser clasificados de acuerdo con su estado de agregación de la materia, por ejemplo: líquidos (bioetanol, biodiesel), gaseosos (biogás, biometano) y sólidos (leña, carbón, residuos agrícolas, forestales, etc.) (*Masera, et al., 2011*). Este trabajo aborda a los biocombustibles sólidos (BCS), específicamente los conocidos como pellets, obtenidos de un origen indirecto (residuos agrícolas y forestales).

Los pellets son aquellos BCS densificados que provienen del procesamiento de los residuos forestales y agrícolas, los cuales tienen la particularidad de lograr una densidad energética de la biomasa mayor a la de los combustibles convencionales (*Marcos, & Camps, 2002*). Algunas de las tecnologías fabricadas para el consumo de pellets van desde estufas y gasificadores de gran y pequeña escala para la cocción de alimentos, hasta calefactores y calderas inteligentes para el calentamiento de interiores y la producción de calor a nivel industrial (*Segura, 2007; Wöhler et al., 2017; Fournel et al., 2015*). En el mercado existen otras tecnologías similares capaces de aprovechar dichos pellets para satisfacer distintas necesidades. Los “microgasificadores de biomasa” son un ejemplo de

este tipo de tecnologías, tienen la particularidad de resolver necesidades de generación de calor como la cocción de alimentos y la calefacción; reduciendo enfermedades respiratorias.

Los gasificadores de biomasa son dispositivos que convierten la biomasa sólida en gases, que posteriormente se pueden quemar de manera controlada y eficiente. Por lo tanto, un microgasificador se refiere a aquel gasificador de baja potencia (5-10 kW) y que usualmente es lo suficientemente pequeño como para caber por debajo de una olla y a una altura conveniente para el usuario (*Roth, 2011*).

Los microgasificadores de biomasa tienen el potencial para realizar tareas de cocción de alimentos que forman parte del contexto mexicano y su gastronomía. Un claro ejemplo son las tortillas de maíz ya que son el alimento más importante dentro de la dieta de los mexicanos, pues por su tradición e historia representan un patrimonio cultural (*Novelo & García, 1987*). Es bien sabido que esta actividad (realizar tortillas de comal) es muy común en nuestro país, especialmente en aquellas localidades rurales donde por lo general se utilizan fogones tradicionales de leña para la realización de este alimento.

El objetivo de la presente investigación es evaluar el perfil de emisiones por el uso de un microgasificador de biomasa alimentado por diferentes tipos de pellets (agrícolas y forestales) para satisfacer la tarea de elaborar tortillas de comal, se espera determinar las ventajas y limitaciones del dispositivo bajo estudio en término de emisiones con relación a los diferentes tipos de pellets analizados y otras tecnologías y fuentes energéticas que se han reportado previamente en la literatura como lo son los fogones a cielo abierto y las estufas patsari de leña, dentro del contexto nacional.

1.2 Justificación

El ser humano tiene necesidades energéticas, en el caso de México, la leña es el BCS prioritario en las zonas rurales para satisfacer tareas de cocción, calentamiento de agua y calefacción en los hogares. La leña es usada principalmente en tecnologías ineficientes como fuegos abiertos, lo que provoca grandes consumos energéticos, bajas eficiencias térmicas y de combustión con impactos en el ambiente y la salud de los usuarios. En 2012 la OMS estimó 4.3 millones de muertes prematuras por el uso de BCS ineficientes en espacios interiores en el mundo y alrededor de 81,000 muertes para el continente americano (World Health Organization: WHO, 2014).

Actualmente existen alrededor de 28 millones de usuarios de leña en México, así como una desigualdad energética nacional en donde las zonas marginadas son las más vulnerables (Días Jiménez et al., 2011).

Por otro lado, existe un potencial de residuos biomásicos en el país que no se aprovechan, muchas veces se queman a cielo abierto en fuegos no controlados.

Esta investigación busca aprovechar tres tipos de residuos biomásicos agrícolas para satisfacer necesidades energéticas, específicamente cocción de tortillas que es una tarea básica en la dieta de México y Centroamérica. Actualmente solo existen estudios sobre el uso y aprovechamiento de residuos forestales (Fierros, 2019), pero se desconoce la caracterización de BCS procesados (pellets) de residuos agrícolas. Incluso este tipo de combustibles no han sido evaluados en tecnologías de uso final para satisfacer tareas de cocción en el ámbito nacional. No se tienen evidencias de los desempeños energéticos y de emisiones de este tipo de combustibles. Por lo tanto, no se conoce si estos combustibles en combinación con tecnologías limpias como gasificadores son una opción factible para los usuarios, una oportunidad para aperturar mercados locales/nacionales, impulsar la transición energética y mitigar contaminantes en la atmosfera. Del mismo modo se busca proponer mejoras e innovación con miras a tener una alimentación continua para evaluar la factibilidad de implementar este tipo de tecnología en actividades como la cocción de alimentos. Este estudio también documentó las ventajas del uso de pellets y gasificadores en términos de ahorros energéticos y mitigación de GEI, e incluye las limitantes

de una alimentación por cargas (batch) en este tipo de tecnologías, distribuciones de calor adecuadas en la superficie de cocinado (en donde la altura del mismo combustible es una variable), así como las potencias mínimas de operación.

Esta investigación es innovadora, pionera e integra aspectos tecnológicos, ambientales y culturales para el uso de pellets agrícolas en gasificadores para cocción de tortillas. Además, se muestra información novedosa para determinar si tecnologías en el mercado pueden satisfacer una tarea de cocinado básica e importante como la elaboración de tortillas.

1.3 Objetivo general

Evaluar el desempeño energético y emisiones de un microgasificador (Atzimba XL10) que funciona con pellets agrícolas y forestales para satisfacer la tarea de elaborar tortillas en el contexto mexicano, así como identificar los retos, limitantes y beneficios.

1.4 Objetivos particulares

- Analizar cualitativa y cuantitativamente las principales características fisicoquímicas de 3 tipos de pellets de residuos agrícolas y forestales: café, agave y pino; poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), % de cenizas, % humedad, % volátiles y %carbono fijo.
- Implementar pruebas de cocinado controlado (CCT) para la evaluación del microgasificador utilizando pellets agrícolas y forestales; considerando el consumo de combustible y de energía, tiempo de cocción y potencia de cocinado.
- Determinar y comparar los factores de emisión de gases de efecto invernadero del uso de pellets de residuos agrícolas y forestales en la tarea de cocción de tortillas; metano (CH₄), carbono negro (BC), carbono orgánico (OC), no metánicos (HCNM), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y PM_{2.5}.
- Comparar los resultados de emisiones y desempeños energéticos de los pellets agrícolas y forestales con el uso de leña en un dispositivo tradicional (fogón tipo “U”).

1.5 Preguntas de investigación

Obj. 2. ¿Es técnica y ambientalmente factible utilizar este tipo de tecnologías de combustión a base de pellets agrícolas y forestales para satisfacer la tarea de elaborar tortillas de comal en el sector rural doméstico mexicano?

Obj. 3. ¿Existen diferencias significativas en cuanto a las emisiones generadas por cada tipo de pellet en el microgasificador y con relación a los dispositivos tradicionales?

Obj. 3. ¿Qué tipo de pellet tiene un mejor desempeño térmico y de emisiones dentro del microgasificador para satisfacer la tarea de elaborar tortillas?

Obj. 4. ¿Se presentarán mitigación y ahorros energéticos asociados al uso de microgasificadores alimentados por pellets, en relación con las principales estufas tradicionales (fogones y estufas patsari) que se utilizan usualmente para satisfacer la tarea de elaborar tortillas en México?

1.6 Hipótesis

Obj. 1. Si las propiedades fisicoquímicas de los diferentes tipos de pellets varían entre sí, entonces habrá diferencias en el perfil de emisiones relacionado a la combustión de cada tipo de pellet en el microgasificador.

Obj. 1. El pellet que presente mejores propiedades fisicoquímicas tendrá un mejor desempeño térmico y de emisiones dentro del microgasificador.

Obj. 3-4. Si el microgasificador alimentado con pellets presenta mejores resultados en el perfil de emisiones comparado con los dispositivos tradicionales de cocción en México, entonces será energética y ambientalmente factible esta tecnología para satisfacer la tarea de elaborar tortillas de comal en el sector rural doméstico mexicano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Propiedades fisicoquímicas de las biomásas y los pellets.

Las propiedades fisicoquímicas de los diferentes tipos de biomasa varían de acuerdo con su procedencia. Yang et al, (2007) menciona que la biomasa proveniente de residuos forestales se compone principalmente por hemicelulosa, lignina y celulosa, además de pequeñas cantidades de extractos, y que la especie determina las concentraciones relativas de estos principales componentes.

Citando a Corredor (2008), por lo general la biomasa presenta bajas concentraciones de carbono y azufre, y altas concentraciones de oxígeno y de compuestos volátiles, los cuales están formados por CO₂, CO, H₂ y por largas cadenas del tipo C_nH_m, quienes son responsables de su poder calorífico. Este poder calorífico asociado a los residuos lignocelulósicos oscila entre los 3000-3500 kcal/kg.

Para realizar estudios asociados al uso de biomasa se recomienda hacer una caracterización de dicha biomasa mediante un análisis inmediato o proximal y un análisis elemental. El análisis inmediato o proximal determina valores como la humedad, el carbono fijo, contenido de volátiles y contenido de cenizas. Mientras que el análisis elemental determina valores de contenido de C, O, N, H y S, además, a partir de la determinación del análisis elemental se pueden establecer los balances de masa y energía de la combustión y determinar algunos efectos ambientales (Corredor, 2008; Na, 2015; Sadaka, 2009; Bustamante-García et al., 2015).

Diversos estudios afirman que las propiedades fisicoquímicas de los residuos biomásicos (forestales o agrícolas) son excelentes como fuentes promisorias de energía (Corredor, 2008). Un ejemplo es el trabajo de Kirubakaran et al, (2007) donde caracterizaron fisicoquímicamente algunos residuos agrícolas como la cáscara de arroz, de coco y rastrojo de maíz con el fin de estudiar el uso de esta biomasa en procesos de gasificación termoquímica. Los resultados arrojaron

valores promisorios en términos energéticos respecto a la normativa internacional, como un alto poder calorífico (19.67 MJ/kg), un bajo porcentaje de cenizas (0.8%) y un contenido de humedad de 12.2%, mostrando de esta manera que fuentes de biomasa residual como la agrícola, pueden ser una opción muy importante para el desarrollo de tecnologías como la gasificación.

En la Tabla 1 se presentan algunos de los valores estándares de parámetros verificados por la norma europea EN 14961-2, cuya norma establece los valores que deben cumplir los pellets procedentes de residuos maderables para su comercialización. El sistema de certificación de calidad ENplus del European Pellet Council (EPC) se encarga de otorgar los sellos de garantía que verifican que el pellet cumpla con los mínimos estándares a partir de una serie de pruebas de calidad. Esta norma establece 3 niveles de calidad de pellets de madera para uso no industrial, la clase A1, A2 y B. En la clase A1 se incluyen pellets de madera de origen forestal y residuos de madera sin tratar químicamente con bajos contenidos en cenizas, nitrógeno y cloro. Dentro de la clase A2 se incluyen los pellets con contenidos en cenizas, nitrógeno y cloro algo mayores que la clase anterior, mientras que en la clase B se permite utilizar madera que proviene del reciclaje (Duca et al., 2014).

Tabla 1. Valores estándares por la norma europea EN 14961-2 para el uso de pellets de residuos forestales de uso no industrial.

PARÁMETRO	UNIDAD	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
Diametro	mm	6±1 - 8±1	6±1 - 8±1	6±1 - 8±1
Longitud	mm	3.15≤L≤40	3.15≤L≤40	3.15≤L≤40
Contenido de Humedad	%	≤10	≤10	≤10
Contenido de cenizas	%	≤0.7	≤1.5	≤3.0
Durabilidad mecanica	%	≥97.5	≥97.5	≥96.5
Poder Calorifico Inferior	MJ/Kg	16.5≤Q≤19	16.3≤Q≤19	16≤Q≤19
Densidad a granel	Kg/m3	≥600	≥600	≥600
Contenido de N	%	≤0.3	≤0.5	≤1.0
Contenido de S	%	≤0.003	≤0.003	≤0.004
Contenido de Cl	%	≤0.002	≤0.002	≤0.003
Comportamiento de fusión de cenizas	°C	≥1200	≥1100	≥1100
Tipos de maderas permitidas para la producción de pellets		Troncos y residuos no tratados químicamente	Árboles enteros sin raíces, troncos, residuos de tala, cortezas y residuos no tratados químicamente	Bosque, plantación y otra madera virgen, residuos y madera usada no tratados químicamente

Fuente: Duca et al., 2014.

Uno de los parámetros importantes que se debe tener en cuenta es la determinación de cenizas ya que es un residuo de la combustión y puede utilizarse como un subproducto, además su comportamiento juega un papel importante dentro de la tecnología de combustión ya que pueden existir pérdidas económicas, además de que su composición química puede contribuir a la escorificación y corrosión del dispositivo de uso final (ISO 18122:2015).

Realizar una caracterización fisicoquímica previa al uso o aprovechamiento de cualquier residuo forestal o agrícola es de suma importancia, pues dependiendo de los valores determinados en los análisis proximal y elemental, se pueden identificar las probables consideraciones y aplicaciones que se pueden implementar con la biomasa residual.

En cuanto a los pellets, al ser un biocombustible originado de la biomasa, se debe realizar la caracterización antes mencionada con base en los mismos términos para conocer las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual que será aprovechada.

2.1.2. Tipos de microgasificadores, características y beneficios asociados.

Existen diversos tipos de microgasificadores, éstos dependen de la entrada y el flujo de aire indispensables para las diferentes etapas del proceso: encendido, pirólisis, gasificación y combustión. Principalmente se clasifican en gasificadores de *lecho fijo o descendente* y *lecho fluidizado* (Figura 1). Los de lecho fijo se distinguen porque el combustible se alimenta por la parte superior del gasificador y la extracción de cenizas se hace por la parte inferior. Estos a su vez se clasifican por el diseño del reactor en *aire ascendente* (Updraft) o *aire descendente* (Downdraft). Los de aire ascendente se caracterizan por obtener el gas en la parte superior del gasificador mientras que por lo regular los de aire descendente expulsan el gas por la parte inferior del mismo (Bueno, 2006; Suárez & Meza, 2013).

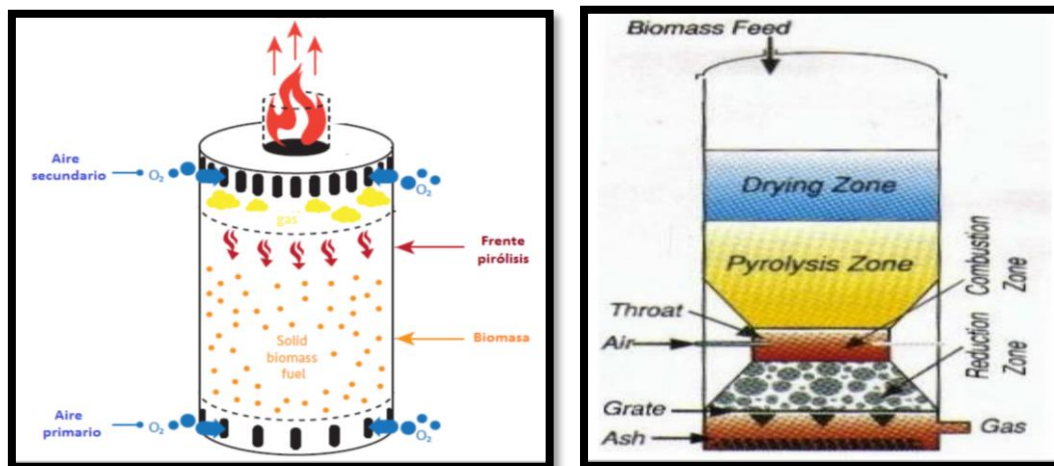


Figura 1. Gasificadores de lecho fijo. Gasificador de lecho fijo de aire ascendente (Izquierda)/ Gasificador de lecho fijo de aire descendente (Derecha). Extraídas de Pérez, 2017; Bueno, 2016.

El otro tipo de gasificadores de biomasa, son los de *lecho fluidizado* (Figura 2), éstos se distinguen porque se alimentan por una parte lateral del gasificador,

además mantiene una temperatura muy uniforme, lo que provoca que los gases salgan a temperaturas muy elevadas, y se puede utilizar altos contenidos de humedad de la biomasa, mantiene una buena relación entre la transferencia de calor y materia. Sin embargo, este sistema regularmente es utilizado a gran escala, por ende, es más caro y complicado de utilizar (Bueno, 2006, Rowland 2010).

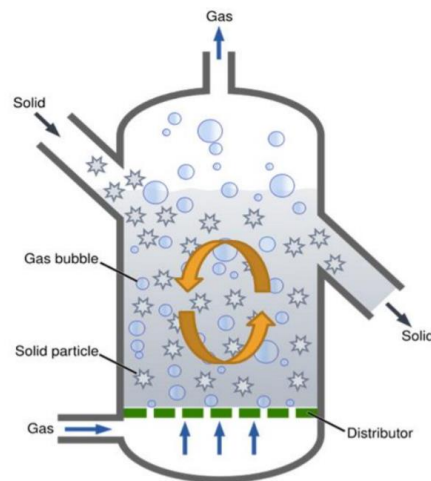


Figura 2. Diagrama de un gasificador de lecho fluidizado.

Además de esas clasificaciones podemos encontrar gasificadores de biomasa con entrada de combustible continua y de una sola carga. La ventaja de los gasificadores de entrada de combustible continua es que, se le puede estar alimentando de combustible en cualquier momento, contrario con los de una sola carga, que se necesita que se consuma todo el combustible empleado para poder alimentar al gasificador con más combustible.

También podemos encontrar gasificadores de tiro natural o de tiro forzado. Los de tiro forzado se diferencian por tener un dispositivo extra (ventilador) que suministra el aire, mientras que los de tiro natural no lo tienen y el aire entra por otra parte del microgasificador de manera natural (Anderson et al., 2007).

Cuando se alimenta biomasa al gasificador, las partículas constituyentes (por ejemplo, astillas y residuos forestales o agrícolas) se secan por medio de calor en el gasificador (fase de secado), liberando vapor a la fase gaseosa. Al calentarse aún más la biomasa seca, esto provoca la pirólisis (siguiente fase), es decir ocurre una descomposición de la biomasa por el calor. Primero, los

compuestos volátiles se desprenden de las partículas; luego, las moléculas más grandes, como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, comienzan a descomponerse, emitiendo fragmentos a la fase gaseosa. Finalmente, una estructura porosa rica en carbono permanece, la cual es comúnmente conocida como el carbón residual. Si se utiliza un oxidante, como aire u oxígeno (el gasificador también se puede calentar indirectamente), los hidrocarburos liberados y el carbón vegetal se queman parcialmente, formando CO₂, CO, agua y liberando calor (Brandin & Tunér, 2011).

En este trabajo se utilizará un microgasificador de lecho fijo de aire ascendente de tiro forzado como se representa en la figura 1 (izquierda). Cabe destacar que el microgasificador de nombre "Atzimba A10 XL" empleado en este trabajo no es comercial, si no que fue construido por Gutiérrez et al, (2015).

Beneficios

De acuerdo con Roth et al. (2014); Los microgasificadores de biomasa presentan ciertas ventajas en comparación con las estufas convencionales de leña o carbón.

- Producen una combustión más limpia de la biomasa sólida (reducción considerable de hollín, carbón negro y contaminación del aire interior / exterior).
- Más eficientes debido a una combustión más completa (menor consumo total de biomasa).
- Utilizan una amplia variedad de residuos de biomasa de tamaño pequeño.
- Los combustibles de biomasa sólida a menudo están disponibles localmente, son fáciles de transportar y de almacenar después de la recolección.
- La creación de gas a partir de biomasa seca se puede lograr con una tecnología muy simple y económica.

2.1.3. Uso de microgasificadores alimentados por biomasa.

Los microgasificadores se acercan al concepto de generación de calor a base de madera y biomasa de una manera completamente diferente: Los gasificadores separan la generación de gases combustibles de su subsecuente combustión para crear calor para cocinar. Las ventajas de gasificación han sido conocidas desde hace casi doscientos años, pero sólo recientemente fueron adaptadas de forma fiable a escala lo suficientemente pequeña (micro) y adecuadas para estufas domésticas (Roth, 2011).

Estos gasificadores de biomasa son dispositivos que convierten la biomasa sólida en gases, que posteriormente se pueden quemar de manera controlada. Roth, (2011) denomina a un microgasificador como aquel gasificador lo suficientemente pequeño como para caber por debajo de una olla a una altura conveniente para el usuario.

Como se mencionó anteriormente, los microgasificadores son dispositivos productores de gas, estos consisten en un recipiente generalmente cilíndrico con espacio para combustible, entrada de aire, salida de gas y rejilla. Pueden estar hechos de ladrillos refractarios, acero u hormigón, barriles de petróleo, etc. El diseño del gasificador depende del tipo de combustible utilizado y de si el gasificador es portátil o estacionario (Turare, C.1997), un ejemplo se muestra en la figura 3 . Los combustibles que se pueden usar con el microgasificador van desde pellets agrícolas y forestales, briquetas, astillas forestales, residuos agrícolas secos como cáscaras de maní, rastrojo de maíz, bagazo de caña de azúcar e incluso carbón (Roth, 2011).



Figura 3. Ejemplos de microgasificadores.

La ventaja de esta tecnología es el sistema descentralizado de conversión de energía que funciona económicamente incluso a pequeña escala (Turare, C.1997), además es fácilmente replicable y puede ser adaptado a las condiciones y contextos del espacio. Por esta y las demás razones es porque se concibe a estos dispositivos como una ecotecnología.

Los microgasificadores de biomasa pueden satisfacer 3 de las necesidades básicas humanas identificadas por Moreno et al (2014) (Figura 4). La energía y el tema de la alimentación son las principales necesidades que cubre esta ecotecnología ya que se requiere una menor cantidad de energía (combustible) a comparación de las estufas tradicionales de leña para satisfacer las distintas tareas de cocción de alimentos que requieren las personas. La otra necesidad identificada que se puede cubrir es el manejo de los residuos ya que se pueden emplear desechos agrícolas o forestales como combustible y así aprovechar de mejor manera los residuos generados.

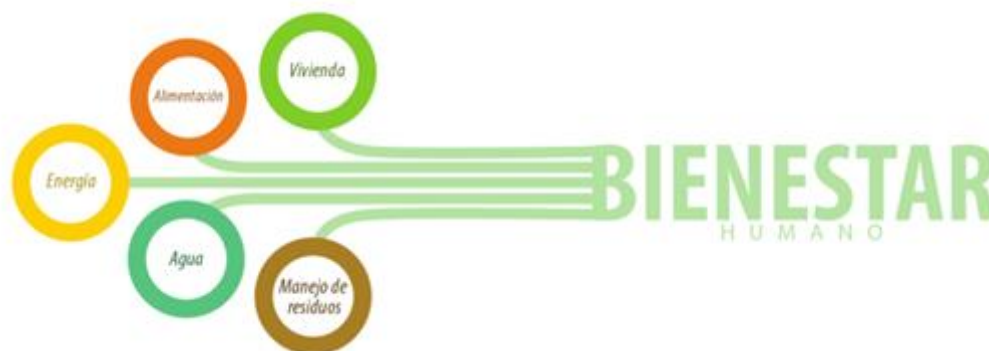


Figura 4. Necesidades básicas humanas consideradas por Moreno et al., 2014.

Los microgasificadores tienen una amplia gama de ventajas dirigidas tanto al usuario como al medio ambiente, reducen la deforestación por la disminución del consumo de leña, se reduce también la dependencia a los combustibles fósiles por la adopción de biomasa como combustible. A lo que refiere al usuario tiene múltiples beneficios pues no afecta tanto a la salud de las personas por los gases emitidos en comparación con fogones tradicionales ya que se efectúa una combustión mucho más completa que los fogones tradicionales y no se emite una gran cantidad de monóxido de carbono y partículas menores a 2.5 micras las cuales son responsables de las enfermedades respiratorias. Además,

los microgasificadores pueden complementar a otras estufas de leña, y no simplemente emplearse por sí solos.

2.1.4. Uso de microgasificadores alimentados con pellets en el sector residencial.

La gasificación no es un tema nuevo, se ha venido utilizando y desarrollando desde hace muchos años. Sin embargo, la microgasificación si es un concepto relativamente moderno, el cual ha presentado el desafío de escalar los sistemas de gasificación convencionales a pequeñas escalas para fines de cocción (Suárez & Meza, 2013).

Las estufas microgasificadoras desarrolladas en la actualidad han sido catalogadas como dispositivos oportunos por la USEPA (Agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos) por sus siglas en inglés, quienes han evaluado sus características y respectivos funcionamientos, en busca de verificar si estas cumplen con las normas oficiales en lo que concierne a la emisión de gases, eficiencias, etc. Es importante enfatizar que la USEPA ha reportado que las estufas microgasificadoras generalmente son de las opciones más limpias y eficientes para utilizar biocombustibles sólidos y satisfacer tareas de cocción (Roth et al., 2014; EPA, s.f).

En el presente, se desarrollan tanto prototipos de estufas microgasificadoras para cocción en el sector residencial como también con fines de generación de calor en procesos industriales en todo el mundo, destacan la participación y uso de estas estufas en comunidades de países de África, América y Asia donde por lo general tienen muchos problemas relacionados con la salud, alimentación o energía (Clean Cooking Alliance, 2020).

Por lo general estas estufas microgasificadoras son muy versátiles y funcionan bien con una amplia variedad de tipos de biomasa, se ha documentado que se utilizan desde pequeños troncos de bambú, de eucalipto, de astillas, residuos agrícolas secos como cáscara de arroz, de café, y en menor medida, pero también eficientes pellets de procedencia forestal (Roth et al., 2014; Roth, 2011).

A continuación, se presentan algunos modelos de estufas microgasificadoras que pueden ser encontradas en el mercado y que se emplean para realizar tareas de cocción de alimentos en el sector residencial:

- **La estufa Sampada:** Originaria de la India en el 2006, fue diseñada por el Instituto de Tecnología Rural Apropiada (ARTI, por sus siglas en inglés), ésta funciona con astillas de madera, pellets y briquetas y para el 2011 ya se habían vendido más de 500 dispositivos (Figura 5-A) (Roth et al., 2014).
- **Estufa MJ Biomass Gas Stove:** Es otra opción un poco más sofisticada, dispone del mismo diseño del reactor de aire ascendente que la estufa anterior, ésta fue desarrollada en Indonesia con el objetivo de ser llevada a las comunidades marginales de esa región donde puede ser utilizado el carbón residual producto de la combustión para actividades como la fertilización del suelo. Ofrece 1 kW de potencia. (Figura 5-B) (Improved Biomass Cooking Stoves, 2008).
- **Estufa BMC para cascarilla de arroz:** Diseñada en Filipinas, para utilizarse en tareas de cocción de alimentos en sectores de esta región donde cuentan con abundancia del residuo de la cáscara de arroz. Esta estufa tiene además implementado un ventilador para suministrar el aire primario. Ha tenido un gran éxito pues se han vendido más de 2,000 dispositivos y se han realizado mejoras a nuevos modelos con el mismo objetivo (Figura 5-C) (Roth et al 2014; Belonio 2005).

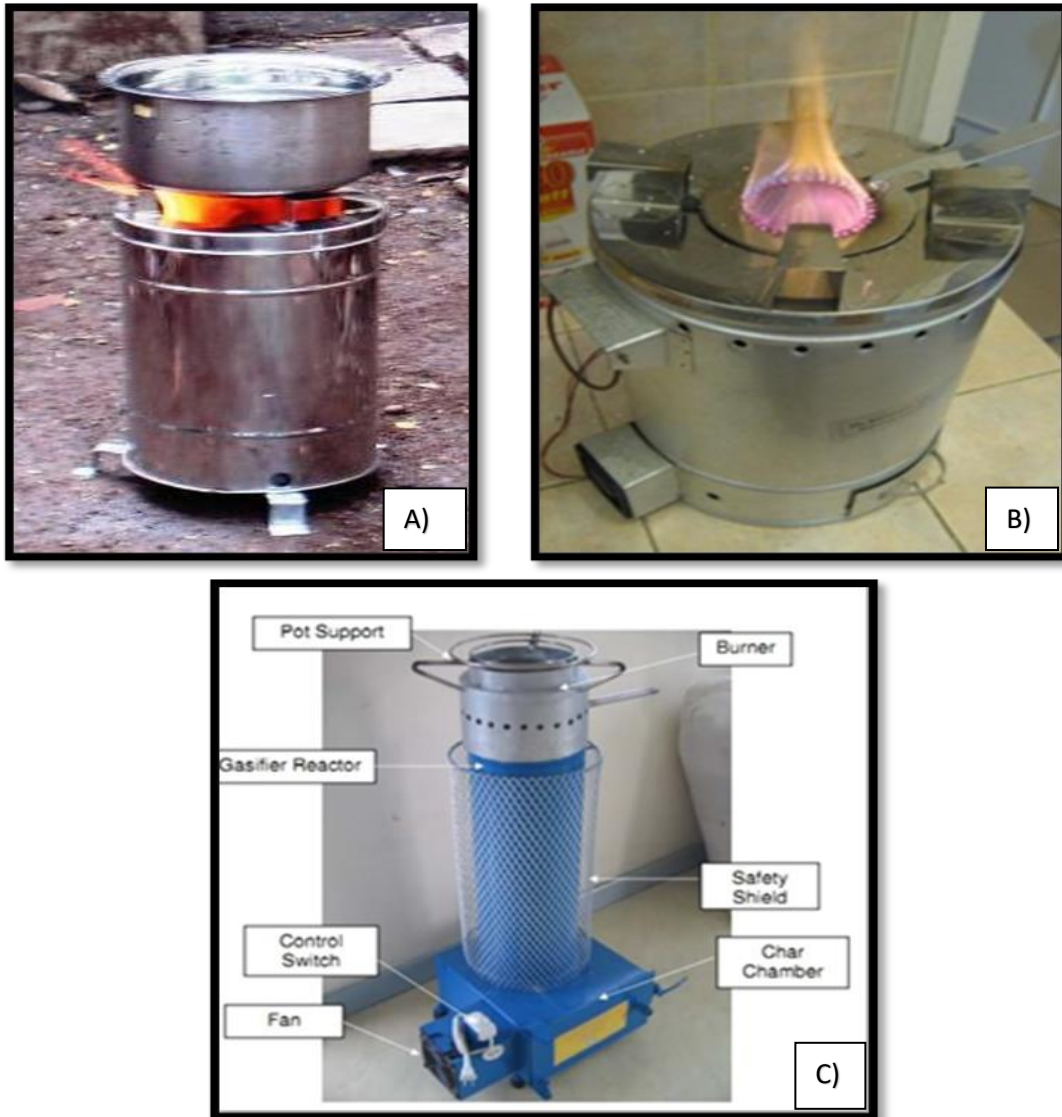


Figura 5. Estufas microgasificadoras comerciales. **A)** Estufa microgasificadora *Sampada*¹. **B)** Estufa microgasificadora *MJ Biomass Gas Stove*² **C)** Estufa microgasificadora de cascarilla de arroz *BMC* y sus partes³

Fuente¹: <https://www.techxlab.org/solutions/appropriate-rural-technology-initiative-sampada>

Fuente²: <https://stoves.bioenergylists.org/taxonomy/term/1651>

Fuente³: http://bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf

Como se ha visto hay una gran variedad de estufas microgasificadoras por cada usuario y región, actualmente muchas de éstas se encuentran libre de patente para que cada uno pueda hacer la suya con los materiales que tenga a la mano y adecuarlas a sus necesidades, ya sea de cocción de alimentos o de aprovechamiento del carbón residual. Algo importante que hay que recalcar es que entre las estufas microgasificadores revisadas para tareas de cocción de

alimentos en el sector residencial, éstas ofrecen una potencia media que va desde 1 kW hasta 5 kW (Roth, 2011).

2.1.5. Análisis del perfil de emisiones del uso de microgasificadores de biomasa

Para que un microgasificador de biomasa o una estufa eficiente puedan salir al mercado necesitan cumplir con ciertos requerimientos establecidos por instituciones certificadas (REMBIO, 2019).

Como sabemos las estufas eficientes tienen la característica de ser más limpias y por ende disminuir en la manera de lo posible las emisiones relacionadas a los gases dañinos tanto a la salud de los usuarios como al medio ambiente. Por ello la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó una guía donde se hacen las recomendaciones y especificaciones que se deben llevar a cabo al momento de usar cualquier tipo de combustible para la cocción de alimentos dentro de los hogares y reducir las emisiones intramuros que se desprenden de este proceso (World Health Organization, 2014). Prueba de ello es la siguiente tabla donde se detallan las tasas de emisiones de intramuros máximas permisibles por la actividad de combustión de cualquier tipo de combustible empleado, principalmente para satisfacer tareas de cocción de alimentos (Tabla 2).

Tabla 2. Emisiones de intramuros máximas permisibles de CO y PM2.5 derivadas de la combustión de combustibles domésticos con ventilación y sin ventilación.

RECOMENDACION	TASAS OBJETIVO DE EMISIONES		INTENSIDAD DE RECOMENDACION
Las tasas de emisión de la combustión doméstica de combustible no deben exceder los siguientes objetivos de tasa de emisión (ERTs) de PM2.5 y CO.	PM 2.5 (sin ventilación)	0.23 (mg/min)	Fuerte
	PM 2.5 (ventilado)	0.80 (mg/min)	
	CO (sin ventilación)	0.16 (g/min)	
	CO (ventilado)	0.59 (g/min)	

Fuente: World Health Organization, 2014

Además de la OMS, existen otros niveles permitidos emitidos por instituciones como la ISO los cuales se presentan en la Tabla 3 y 4.

Tabla 3. Factores de emisiones predeterminados, tasas, concentraciones equivalentes y porcentaje (%) de hogares que cumplen los criterios especificados para PM_{2.5}.

	NIVEL	RR	mg/MJd	Tasa de emisión normalizada (mg/min)	µg/m ³	Porcentaje de hogares que cumplen con el nivel
MEJOR RENDIMIENTO ↑	5	1	≤5	≤0,2	≤10	≥90 %
	4	≤1,5	≤62	≤2,7	≤50	≥50 %
	3	≤2,5	≤218	≤9,5	≤170	≥50 %
	2	≤3,0	≤481	≤21	≤400	≥50 %
	1	≤3,15	≤1031	≤45	≤800	≥50 %
	0	>3,15	>1031	>45	>800	<50 %

Nota: los informes de niveles se basan en el factor de emisión y la tasa de emisión normalizada se deriva de la propiedad. Las tasas de emisión medidas de las pruebas de laboratorio no se utilizan para determinar los niveles de presentación de informes. Las emisiones se expresan en mg/MJd donde MJd se refiere a la energía en MJ entregada a la olla. El nivel se expresa de 0 a 5 donde 0 es un valor para el rendimiento más bajo y 5 para el mejor rendimiento de acuerdo con los factores de emisión.

Fuente: ISO (International Organization for Standardization) (2020).

Tabla 4. Factores de emisiones predeterminados, tasas, concentraciones equivalentes y porcentaje (%) de hogares que cumplen los criterios especificados para CO.

	NIVEL	Factor de emisión g/MJd	Tasa de emisión mg/min	Concentración de 24 hrs al 50% de cobertura mg/m ³ (ppm)	Concentración en tarea de cocinado al 50% de cobertura mg/m ³ (ppm)	Porcentaje de hogares cubiertos a 7 mg / m ³ promedio diario	Porcentaje de hogares cubiertos a 230 mg / m ³ durante cocinado
MEJOR RENDIMIENTO ↑	5	≤3,0	≤133	2,3 (2,0)	13,6 (11,9)	≥90 %	≥90 %
	4	≤4,4	≤190	3,2 (2,8)	19,3 (16,8)	≥80 %	≥80 %
	3	≤7,2	≤315	5,4 (4,7)	32,6 (28,5)	≥60 %	≥60 %
	2	≤11,5	≤500	8,8 (7,7)	52,5 (45,8)	≥40 %	≥40 %
	1	≤18,3	≤800	14 (12,2)	84,1 (73,4)	≥20 %	≥20 %
	0	>18,3	>800	14 (12,2)	84,1 (73,4)	<20 %	<20 %

Fuente: ISO (International Organization for Standardization) (2020).

Dichas tablas presentadas anteriormente son recomendaciones y niveles que las distintas organizaciones proponen y emiten para tales fines, por lo que son adaptables dependiendo del tipo de proyecto o comparación que se desee realizar.

A continuación, se presentan algunos datos recabados de emisiones (Tabla 5) y características de algunos microgasificadores comerciales y que ilustran las principales propiedades que presentan estos dispositivos de cocción.

Tabla 5. Emisiones y características de algunos microgasificadores de biomasa comerciales.

MODELO		TIPO DE MICROGASIFICADOR	EFICIENCIA TÉRMICA	TIPO DE COMBUSTIBLE	MICROGASIFICADORES DE BIOMASA												
					EMISIONES INTRADOMICILIARIAS					EMISIONES AL AIRE LIBRE							
					CO	PM	CO	PM 2.5	CO2	CARBONO ELEMENTAL (EC)	CARBONO ORGANICO (OC)						
ACE 1 (African Clean Energy)	De corriente ascendente (TUUD)	41.5% (MVA)	Residuos de cosecha, estercol, pellets.	ALTA POTENCIA	BAJA POTENCIA	ALTA POTENCIA	BAJA POTENCIA	FACTOR DE EMISIÓN (Valor Máx.)	TASA DE EMISIÓN (Valor Máx.)	FACTOR DE EMISIÓN (Valor Máx.)	TASA DE EMISIÓN (Valor Máx.)	FACTOR DE EMISIÓN (Valor Máx.)	TASA DE EMISIÓN (Valor Máx.)	FACTOR DE EMISIÓN (Valor Máx.)	TASA DE EMISIÓN (Valor Máx.)		
Elegance 2015	De corriente ascendente (TUUD)	35.44% (MVA)	Pellets de madera, pequeñas ramas, astillas.	0.023 g/min	0.075g/ni n	7.91 mg/min	3.33 mg/min	56.3g/kg comb.	0.81 g/min	6.1g/kg comb	93.6mg/m in	2276.0 g/kg comb.	27.38g/ni n	1.5g/kg comb.	19.3mg/min	2.0g/kg comb.	19.3mg/ni n
SolveTec TUUD prototipe	De corriente ascendente (TUUD)	53.2% (MVA)		0.055 g/min		3.351 mg/min		12.8125 g/kg comb.	0.055 g/min	0.7435g/k g comb.	3.315689 mg/min						
Phillips HD4008	De corriente ascendente (TUUD)	34.4% (MVA)	Trozos de madera	0.675 g/min		41.375 mg/min		59.7g/kg comb.	0.675 g/min	4.3975 g/kg	41.6736 mg/min						
Berkeley-Darfur Stove V.14	De corriente ascendente (TUUD)	37.4% (MVA)	Briquetas, trozos de madera	0.511 g/min		34.75mg/min		63.875 g/kg comb.	0.511 g/min	4.25 g/kg comb.	35.0082 mg/min						
Biolite HomeStove	De corriente ascendente (TUUD)	33% (MVA)	Residuos de cosecha, estercol, trozos de madera.	0.07g/min	0.28g/min	12.3 mg/min	6.0 mg/min	4.72 g/kg comb.		0.566 g/kg comb.		1213g/kg comb.		0.5176 g/kg comb.		2.4 g/kg comb.	
Emirofi G-3300	De corriente ascendente (TUUD)	39.4% (MVA)	Trozos de madera	0.0158 g/min	0.296 g/min	12.9 mg/min	3.6 mg/min	47.0 g/kg comb.	0.449g/ni n	5.0 g/kg comb.	27.5984 mg/min						
Sampada	De corriente ascendente (TUUD)	27.6% (MVA)	Briquetas, residuos de cosecha, pellets, trozos de madera	0.762 g/min		44.958 mg/min		45.47 g/kg comb.	0.762 g/min	2.7225 g/kg comb.	44.0892 mg/min						

Fuente: cleancookingallance.org

2.1.6. Evaluaciones de los dispositivos empleados para la producción de tortillas a escala residencial en México.

Las emisiones relacionadas con cada nuevo dispositivo y su respectivo combustible son muy importantes para comparar con los dispositivos y combustibles tradicionales en busca de encontrar posibles alternativas de mejora. Se han documentado diversos estudios donde resaltan la importancia de las estufas eficientes por la reducción de emisiones de gases contaminantes. Tal es el caso del estudio realizado por Blanco et al. (2012) donde evaluaron diversas estufas eficientes de leña en comparación con un Fogón tradicional de leña, mediante un método de prueba de cocinado controlado (PCC), el cual consistió en determinar el gasto de leña vs un kilo de tortilla (Figura 6). Los resultados resaltan la reducción de gases como el CO en concentraciones de 5 veces menores en las estufas eficientes que en el fogón de leña y reducciones de hasta 21 veces en las concentraciones de PM_{2.5} gracias a las estufas eficientes de leña.

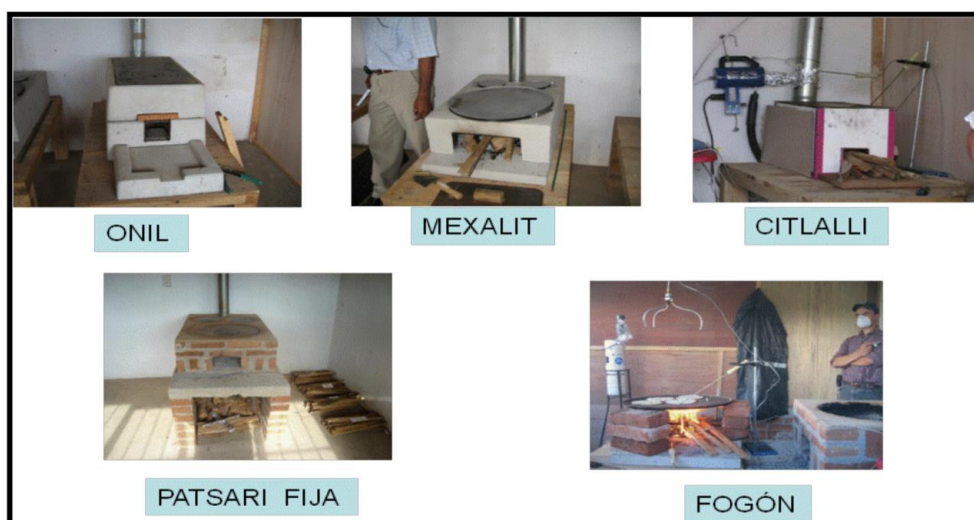


Figura 6. Estufas de cocción empleadas en el trabajo de Blanco et al (2012).

Otros estudios como el de Hernández (2014), muestran la disminución de la cantidad de combustible empleado en las estufas eficientes de leña en comparación con los fogones tradicionales, donde las familias se ahorran poco más de 0.5 kg de combustible al día por persona, lo que significa un gran ahorro

a través del tiempo y un mejor aprovechamiento de la leña como fuente energética. Además, destacan un significativo ahorro en el consumo de combustible de la estufa eficiente de leña empleada en el estudio, donde en comparación con el fogón tradicional que por lo general cuenta con una eficiencia del 10 %, la estufa mejorada presentó valores que destacan que ésta es un 33% más eficiente en cuanto al uso del combustible, es decir que, por cada kg de combustible empleado en el fogón tradicional, en esta estufa se utilizaría solo 0.67 kg del mismo combustible para satisfacer cierta tarea.

Muchos de los estudios similares encontrados en la literatura (Medina et al., 2019; Medina et al., 2017; Ruíz, 2018), evalúan dispositivos como las estufas eficientes de leña, mencionadas anteriormente, donde comparan con fogones tradicionales, aspectos como su eficiencia térmica, el consumo de combustible por persona al día, el tiempo de cocción de alimentos y pruebas como el de hervir agua (WBT, por sus siglas en inglés) y el de cocinado controlado (CCT, por sus siglas en inglés), los cuales en todos los casos han demostrado mejores desempeños por parte de las estufas eficientes en contraste con los dispositivos tradicionales.

Otro ejemplo donde sobresalen las tecnologías de combustión de alimentos es el trabajo realizado por Medina et al. (2017) donde realizaron una comparación energética y de emisiones entre una estufa eficiente de leña (estufa patsari) y un fogón tradicional tipo "U", realizando pruebas de cocinado controlado (CCT) con alimentos como las tortillas de comal, mismas que se emplearon en esta investigación. En este trabajo de Medina et al. (2017) la estufa patsari demostró mejores desempeños energéticos y de emisiones que el fogón tipo "U" al momento de realizar tortillas de comal, donde se reflejó un menor consumo de leña y energía para realizar la misma cantidad de tortillas que en el fogón, además de que se obtuvieron mejores resultados en cuanto a los factores de emisión, donde la estufa patsari emitió 47 ± 2 gCO/kg de combustible y 1.7 ± 0.3 gPM_{2.5}/kg, en comparación con el fogón tipo U el cual arrojó resultados mayores de 62 ± 14 gCO/kg y 3.0 ± 0.7 gPM_{2.5}/kg, demostrando de esta manera que las estufas eficientes de leña superan en calidad de combustión y limpieza a las estufas tradicionales de leña.

Sin embargo, aún no se tienen muchos registros y evaluaciones de estufas microgasificadoras satisfaciendo tareas de cocción, y menos para la elaboración de tortillas; sabemos ya, que hay una gran variedad de ellas en el mercado, pero no todas destacan los datos y parámetros térmicos de las estufas, lo cual es importante para tener en cuenta al momento de acceder a una de ellas.

2.1.7. Pobreza energética y situación contemporánea por COVID-19

La energía está vinculada prácticamente con todas las personas diariamente, pues corresponde a todas las actividades de la vida cotidiana. Sin embargo, existen lugares y situaciones donde la energía consumida por habitante es mucho menor que en otras zonas geográficas, lo que se ve reflejado en problemas en la satisfacción de necesidades básicas como la luz, la comida, la calefacción, el agua, entre otras. Esta marginación o inaccesibilidad de los servicios básicos energéticos se le conoce hoy en día como pobreza energética. Según Ochoa R. (s.f.) “Un hogar se encuentra en pobreza energética cuando las personas que lo habitan no pueden satisfacer las necesidades de energía absolutas, las cuales están relacionadas con una serie de satisfactores y bienes económicos que son considerados esenciales, en un lugar y tiempo determinados, de acuerdo con las convenciones sociales y culturales”.

En el mismo trabajo de García Ochoa (s.f.) se muestra que para el caso de México existían para el año 2014 alrededor de 12.4 millones de hogares (43% del total) en pobreza energética, una cifra muy alta que tiene que ser considerada por las políticas públicas del país. Resaltando un poco más a las localidades rurales podemos encontrar que existe una mayor marginación tanto social como energética en estos sitios, encontrando que alrededor de 4.5 millones de hogares rurales (16% del total nacional) se encuentran en pobreza energética y por ende no pueden satisfacer sus necesidades básicas (García Ochoa, s.f.).

Del mismo modo existe una diferencia muy marcada de la pobreza energética específicamente del combustible empleado para cocinar entre las comunidades rurales y urbanas, siendo las localidades rurales las que tienen una mayor deficiencia y marginalidad en este aspecto. Cabe mencionar al respecto que,

para el 2005, había aproximadamente 2,400 millones de personas que utilizaban leña o carbón vegetal como combustible para cocinar, además de 1,600 millones que no contaban con energía eléctrica en sus viviendas y se espera que, para 2030, otros 1,400 millones de personas estén en la misma situación (Modi, et al., 2005).

El acceso y facilidad a combustibles limpios debe ser una prioridad, y más ahora que vivimos eventos catastróficos y fenómenos inesperados como la pandemia por el COVID-19, misma que ha traído consigo una mayor exposición a la contaminación del aire en espacios cerrados por el uso de biocombustibles, generando aproximadamente medio millón de muertes de personas al año por infecciones respiratorias agudas (Masera et al., 2020).

Como se ha mencionado, las comunidades rurales mexicanas se enfrentan a problemas como la pobreza y derivado de ello, es posible que no puedan pagar ni acceder a combustibles más limpios en términos de salud para cocinar como lo puede ser el gas natural, dependiendo de la leña como su principal combustible (Masera et al., 2020); por lo tanto, se vuelve sumamente complicado revertir sus métodos de cocción tradicionales, que utilizan combustibles de biomasa sólida (leña, carbón). La contaminación del aire en los hogares causada por el uso de combustibles contaminantes aumenta su susceptibilidad a enfermedades transmisibles y, por lo tanto, puede intensificar el riesgo y la gravedad de la infección por COVID-19. Es por ello también que existe una necesidad urgente de ampliar las soluciones de energía sostenible en todo el mundo (Ravindra et al., 2021).

El acceso insuficiente a energía limpia puede acelerar también la propagación del contagio de COVID-19, ya que la mayoría de la población pobre carece de acceso a los requisitos energéticos esenciales que son necesarios para mantener la salud durante la pandemia (Castán Broto & Kirshner, 2020).

La pandemia también ha provocado que se ralentice la transición hacia combustibles limpios en los últimos meses. Las medidas de bloqueo en los diferentes países del mundo han traído consecuencias en estos ámbitos, un ejemplo es el de la India, donde el bloqueo que comenzó el 25 de marzo de 2020 en todo el país ha afectado la capacidad de los hogares para acceder a las

necesidades esenciales. Esto se reflejó un poco más en áreas rurales y remotas que ya luchaban por acceder a combustibles limpios. Los hogares rurales que no tienen acceso a combustibles limpios para cocinar pueden enfrentar mayores problemas de salud que pueden agravar los síntomas del COVID-19 (Schiffer, 2020; Singh et al., 2020).

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del microgasificador evaluado

El microgasificador evaluado y empleado en esta investigación fue prestado por el LINEB, dicho gasificador lleva como nombre *microgasificador de biomasa TLUD-Atzimba A10 XL*. Este dispositivo fue diseñado y evaluado previamente por Gutiérrez et al, (s.f.) donde realizaron una investigación con distintos microgasificadores muy similares a éste conservando el diseño básico dónde cambiaban solamente la altura del dispositivo y el diámetro de la boca del quemador para obtener datos como la tasa de consumo, la potencia entregada, la eficiencia entre otros, comparándolos con diferentes tipos de combustibles.

El diseño de este microgasificador se realizó con base a los modelos convencionales de microgasificadores, en especial al del tipo “TLUD” (*Top-Lit Updraft Gasifier*) con aire forzado. Este diseño se caracteriza por contener 2 cilindros metálicos concéntricos. El cilindro interior se refiere a la cámara de combustión, donde se llevan a cabo todas las fases y reacciones. En la parte inferior de este cilindro hay una rejilla de metal para soportar el peso del combustible y permitir el paso de cenizas a la parte más baja del gasificador. En la parte baja del cilindro interior y sobre la rejilla cuenta con una hilera de orificios periféricos que permiten la entrada del aire primario mientras que por la parte superior de este mismo cilindro cuenta 2 hileras de orificios los cuales se encargan de permitir la entrada del aire secundario. El cilindro exterior se caracteriza por tener un ducto de ventilación el cual suministra el aire primario por medio de un ventilador centrífugo, al cual no se le puede controlar su potencia, es decir no se le puede reducir o incrementar el nivel del flujo del aire y se debe conectar a la corriente eléctrica. Lo que une a los dos cilindros es un anillo metálico y todo el microgasificador reposa sobre una cazuela de barro recubierta de arcilla para impedir que se pierda aire a través de ella (Gutiérrez et al, s.f.). Algunas de las especificaciones aquí descritas se pueden ver en la Figura 7.



Figura 7. Microgasificador de biomasa TLUD-Atzimba A10 XL.

Cabe resaltar también que el quemador o superficie del gasificador no debe soportar ningún comal, cazo, olla o sartén ya que este dispositivo es independiente de la estufa. Las características físicas de este microgasificador, especialmente de los cilindros interior y exterior del dispositivo se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones físicas del microgasificador TLUD-Atzimba A10 XL

<i>Microgasificador A10 XL</i>		
	Cilindro Interior	Cilindro Exterior
Material	Acero Inoxidable 304	Aluminio
Calibre	20	
Diametro (cm)	15	
Altura total (cm)	40	
Altura de orificios de aire primario (cm)	3	
Altura de rejilla (cm)	5	
Altura de orificio de aire secundario fila 1 (cm)	34,5	
Altura de orificios de aire secundario fila 2 (cm)	37	
Diametro de orificios de entrada de aire (mm)	6	
Altura inferior del ducto del ventilador (cm)		7,4
Altura superior del ducto del ventilador (cm)		30,5
Ancho del ducto del ventilador (cm)		8,5

Fuente: Gutiérrez et al. s.f.

3.2 Descripción y caracterización fisicoquímica de los combustibles

Los combustibles que se emplearon y evaluaron en esta investigación fueron dos tipos de pellets agrícolas y un tipo de pellet forestal: cascabillo de café, agave y pino respectivamente (Figura 8).

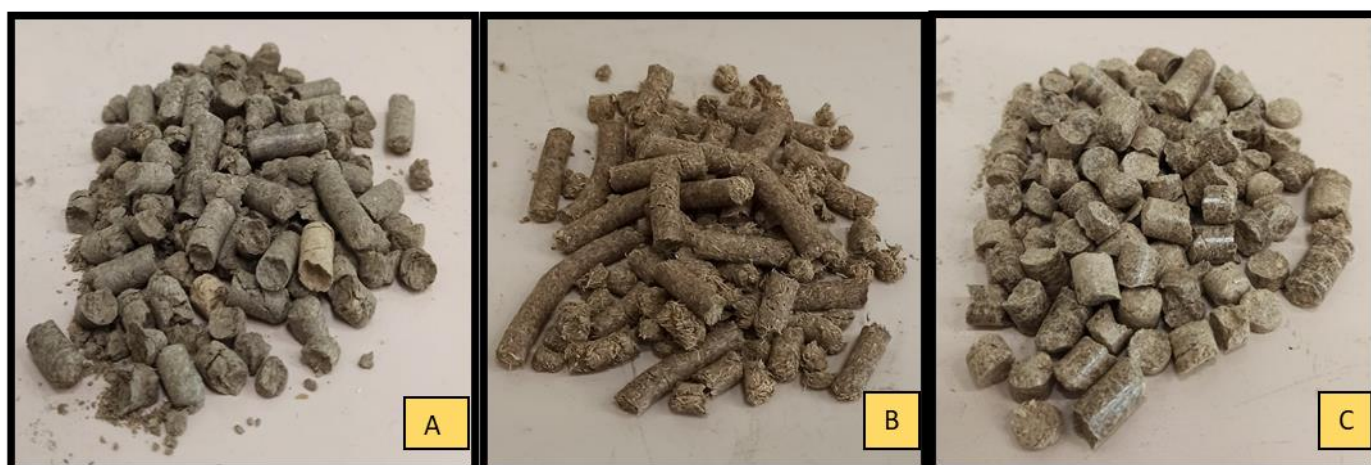


Figura 8. Pellets empleados en este estudio. A) Pellet de café. B) Pellet de agave. C) Pellet de pino.

Todos los pellets empleados fueron comprados y enviados desde su lugar de fabricación al LINEB donde se realizaron las pruebas correspondientes.

El pellet de pino fue fabricado a partir de los residuos de la madera de pino (aserrín principalmente) por la empresa *San Mateo*, Durango, Durango, México; dedicada a la fabricación de pellets como coproductos del aserradero. Este tipo de pellet presentó un diámetro de 8mm.

Los pellets de agave y de cascabillo de café fueron fabricados en la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México, por la empresa *TODO PELLET*.

El pellet de agave pellet se produjo a partir de los residuos del bagazo de agave desprendido durante el proceso de fabricación de destilados de agave. Este tipo de pellet presentó un diámetro de 6mm.

El pellet de cascabillo de café se generó a partir del cascabillo de café, que es la cáscara de la semilla que se desprende al momento de la fabricación del café comercial. El pellet de café tuvo un diámetro de 6mm.

3.3 Caracterización fisicoquímica de los combustibles

Las características fisicoquímicas de los combustibles empleados fueron: humedad, porcentaje de cenizas, poder calorífico y porcentaje de volátiles. Dicha caracterización se llevó a cabo en el área de caracterización del LINEB. Se caracterizaron los pellet de café y pellet de agave, para el caso del pellet de pino, los parámetros se encuentran reportados en la literatura (Arizaga 2021). Los equipos de medición utilizados en esta investigación se detallan en el anexo A.

3.3.1. Determinación de humedad

Se determinó el contenido de humedad (%) de los pellets de agave y de café siguiendo el procedimiento de la Norma Internacional ISO 18134-3:2015. Se realizaron 3 pruebas (n=3) para cada tipo de pellet en un horno de secado.

Primeramente, se secaron los crisoles en donde se iba a depositar la muestra, esto se hizo en el mismo horno de secado por 60 minutos a una temperatura de

100±3°C. Una vez transcurrido el tiempo se sacaron y se dejaron atemperar y estabilizar en un desecador hermético para posteriormente pesarlos vacíos en la balanza semi micro-analítica. Posterior a ello se añadió a cada uno de los crisoles aproximadamente 1 g de muestra de nuestro BCS. Inmediatamente después se volvieron a colocar en el horno de secado a una temperatura de 100±3°C hasta peso constante. Pasado el tiempo se sacaron y se colocaron en el desecador para dejar que se enfriaran y evitando la adquisición de humedad de la atmósfera. Después de ello se pesó cada uno en la balanza y se registraron los datos obtenidos.

El contenido de humedad en base húmeda (M_{ad}) se determinó por medio de la Ecuación 1:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

Ecuación 1

donde:

m_1 es la masa en gramos de la cápsula vacía y la tapa;

m_2 es la masa en gramos de la cápsula, la tapa y la porción de ensayo antes del secado;

m_3 es la masa en gramos de la cápsula, la tapa y la porción de ensayo después del secado.

3.3.2. Determinación de cenizas

Para la determinación de este parámetro se siguió el procedimiento que se indica en la Norma Internacional ISO 18122:2015.

Del mismo modo se realizaron 3 repeticiones por cada tipo de combustible. Primeramente, se acondicionaron los crisoles donde iba a ser depositada cada muestra al igual que en la determinación de humedad, para ello se calentaron los crisoles en una mufla a 550°C por una hora y se dejaron enfriar por 10 minutos en un desecador para después ser pesados en la balanza semi micro-

analítica. Una vez acondicionados los crisoles se les añadió aproximadamente 1 g de muestra y se metieron a la mufla a una temperatura de 550°C por 2 horas donde se aseguraba la entrada de oxígeno a la mufla. Una vez transcurrido el tiempo se retiraban y se dejaban enfriar en el desecador por 10 minutos para después ser pesados y registrados los valores.

La Ecuación 2 se utilizó para la determinación de las cenizas:

$$\%Cenizas_{base\ seca} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Ecuación 2

donde

m_1 es la masa en gramos del crisol vacío;

m_2 es la masa en gramos del crisol más la porción de la muestra;

m_3 es la masa en gramos del crisol más la ceniza;

M_{ad} es el contenido de humedad en porcentaje de la porción de la muestra usada para la determinación.

3.3.3. Determinación de materia volátil.

Para determinar el contenido de la materia volátil se utilizó la norma ISO 18123:2015, con la variante del uso de una mufla de secado y no el equipo especializado indicado en la Norma Internacional. De la misma manera que en las determinaciones anteriores se deben acondicionar los crisoles en donde es depositada la muestra de combustible, la única diferencia es que para este caso los crisoles se meten en la mufla a 900°C por 5 minutos aproximadamente para posteriormente ser pesados.

Es importante que, para la determinación de la materia volátil, los crisoles contengan tapa para evitar el intercambio de oxígeno y otros gases con la muestra. Una vez acondicionados los crisoles, se añade aproximadamente 1 g

de muestra a cada uno y se introducen a la mufla durante 5 minutos a una temperatura de 900°C. Transcurrido el tiempo se sacan y se dejan enfriar por unos 15 minutos en un desecador hermético para posteriormente ser pesados en la balanza semi micro-analítica. Se realizaron 3 repeticiones por cada tipo de combustible. En la Figura 9 se puede apreciar el resultado después del procedimiento de la obtención de la materia volátil.

El cálculo de la materia volátil, V_d expresado en porcentaje de masa en base seca, se calcula mediante la Ecuación 3:

$$V_d = \left[\frac{100 (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] * \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right)$$

Ecuación 3

donde

m_1 es la masa en gramos del crisol vacío con su tapa;

m_2 es la masa en gramos del crisol, su tapa y la porción de muestra añadida antes del calentamiento;

m_3 es la masa en gramos del crisol, su tapa y el residuo después del calentamiento;

M_{ad} es la humedad como porcentaje en masa de la porción de la muestra determinada según la Norma ISO 18134-3.



Figura 9. Residuos de muestra en la determinación de la materia volátil.

3.3.5. Determinación de poder calorífico

Para lograr determinar el poder calorífico de los pellets se utilizó un calorímetro profesional marca *Parr 6100* (Figura 33). Se realizaron 3 pruebas por cada tipo de pellet. Fue necesario primeramente peletizar 1 g de muestra por cada combustible. Mediante el calorímetro podemos obtener el poder calorífico superior. Mediante una bomba de oxígeno se suministra una cantidad exacta de este elemento al equipo para que se pueda llevar a cabo una combustión controlada. El equipo determina la variación de temperatura en el agua para obtener el calor suministrado por el combustible. Cabe resaltar que el equipo fue calibrado antes de las pruebas experimentales mediante pastillas de ácido benzoico tal como lo establece la ISO 18125:2017.

De la Ecuación 4 se obtuvo el poder calorífico superior, donde Q es el calor suministrado por el combustible y m_c es la masa total del combustible.

$$Q = m_c * PCI$$

Ecuación 4

De la Ecuación 5 se obtuvo el poder calorífico inferior (PCI), esta ecuación está basada y determinada por el LINEB, donde M_{ad} es la humedad de la muestra.

$$PCI = Q * (1 - M_{ad}) - (24.43 * (M_{ad} * 100))$$

Ecuación 5

3.3.6. Determinación de Carbono fijo

La obtención del carbono fijo se pudo determinar gracias a que este parámetro corresponde al carbono residual, el cual es el resultado luego de eliminar la humedad, el material volátil de la muestra y el contenido de cenizas. El cálculo del carbono fijo (Cf), se expresa en porcentaje mediante la Ecuación 6, donde M_{ad} es el porcentaje de humedad de la muestra y V_d es el porcentaje de material volátil.

$$\%Cf = 100 - \%M_{ad} - \%Cenizas - \%V_d$$

Ecuación 6

3.4. Desempeño energético

Para la elaboración de tortillas de comal mediante el microgasificador “Atzimba XL10”, los aspectos considerados previos a las evaluaciones fueron: tiempo de combustión, el tiempo de cocinado, la potencia del dispositivo, la cantidad de combustible por carga, la cantidad de masa de maíz, la altura del tope del microgasificador al comal, entre algunas otras. Estos aspectos se definieron mediante pruebas piloto.

Las ecuaciones que se emplearon para la obtención de dichos parámetros se presentan a continuación:

Para conocer la cantidad de consumo de combustible seco empleado en cada prueba se utilizó la Ecuación 7.

$$\begin{aligned} \text{Combustible Seco (Kg)} \\ = \text{Combustible Húmedo (kg)} * (1 - \text{Humedad del combustible}) \end{aligned}$$

Ecuación 7

Para conocer la tasa de quemado, es decir cuanto combustible se consumió por minuto se utilizó la Ecuación 8.

$$\text{Tasa de Quemado } \left(\frac{g}{\text{min}} \right) = \left[\frac{(\text{Consumo eq. de combustible seco (CECS)} (kg) * 1000)}{\text{Tiempo (t)} (min)} \right]$$

Ecuación 8

donde:

$$\begin{aligned} \text{CECS (kg)} \\ = \frac{\left(\text{Comb. seco (kg)} * PCI \left(\frac{kJ}{kg} \right) \right) - \left((M_{ad} * \text{Comb. Húmedo (kg)} * (\text{Calor espec. del agua} * (92 - \text{Temp. Amb. } (^{\circ}C)) + 2257)) + \text{Carbón Res. (kg)} * 29400) \right)}{PCI \left(\frac{kJ}{kg} \right)} \end{aligned}$$

Y así mismo, para conocer la potencia generada por el dispositivo en cada prueba de cocinado realizada se utilizó la Ecuación 9.

$$Potencia\ disponible\ (kw) = \frac{Comb.\ seco\ (kg) * PCI\ (\frac{kJ}{kg})}{Tiempo\ (min) * 60}$$

Ecuación 9

Como se mencionó, se realizaron primero algunas pruebas piloto las cuales permitieron ajustar las cantidades y proporciones exactas para la medición y registro de datos y así mismo conocer los valores más precisos para analizar el desempeño energético del microgasificador.

Para las pruebas piloto se usó como combustible 1 kg pellet de pino (el gasificador tiene una capacidad de 2.5 y 3 kg de combustible), la cantidad de combustible depende de factores como el tamaño, densidad y poder calorífico del combustible. La altura del tope del microgasificador hasta el comal fue de 15 cm, el tope del microgasificador se elaboró con bloques de cemento los cuales permitieron mantener el calor en la superficie de cocción para la elaboración de tortillas y al mismo tiempo aislar del calor y las flamas a la cocinera (Figura 10).



Figura 10. Diseño de las pruebas piloto.

Así mismo, se midió la temperatura del comal en la superficie para garantizar una distribución homogénea de calor para realizar la tarea de cocción de tortillas. Las temperaturas se midieron mediante un termómetro digital FLUKE 52-II y un termopar de contacto tipo “K”.

La tarea de cocción de tortillas se realizó con apoyo de una cocinera en las instalaciones del LINEB, la cocinera tiene más de 10 años de experiencia en la elaboración de tortillas utilizando biomasa. Se utilizaron 1.5 kg de masa para cada una de las pruebas, de esta manera se estandarizó la cantidad de tortillas elaboradas, en la Figura 11 se puede observar el momento de la prueba realizando las tortillas.

Posterior a las pruebas piloto, se definieron las cantidades, proporciones y aspectos necesarios para realizar las pruebas finales (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Cantidades y proporciones de los parámetros por la utilización de cada tipo de pellet en la prueba de cocinado.

COMBUSTIBLE	Pellet de Pino	Pellet de Café	Pellet de Agave
Cantidad de masa (kg)	1.5	1.5	1.5
Distancia del tope del microgasificador al comal (cm)	30	30	22
Cantidad de combustible por carga (kg)	1.1	1.3	1.3
Tiempo para encendido de ventilador después del inicio de la combustión (min)	1.5	1.5	1.5

Nota: En la pág. 59 se explica el porqué de la distancia del tope del microgasificador al comal.

Las pruebas formales involucraron la medición del desempeño energético, la medición de las emisiones de los gases del proceso de degradación térmica y del material particulado. Se realizaron 5 repeticiones en la elaboración de tortillas para cada tipo de pellet. Las cenizas y carbón residual se removieron al finalizar cada evaluación.



Figura 11. Pruebas de cocinado.

3.3. Medición de emisiones resultantes de la combustión

Para determinar las emisiones resultantes de la combustión de los pellets dentro del microgasificador de biomasa, se utilizó una campana de extracción de gases la cual se encuentra en el LINEB de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) la cual está diseñada con base a las especificaciones del estándar ISO/TR 19867-3 (2018). Se capturaron las emisiones totales mediante la campana de extracción de gases. La toma de muestra incluyó puertos de muestreo para contaminantes como: CO, CO₂, CH₄, NMHC, EC, OC y PM_{2.5}, además de la medición de la velocidad y la temperatura del flujo de la muestra.

Gases. Para la medición de CO se utilizó el equipo de medición *TESTO (modelo 340, USA)* que tiene una celda electroquímica que permite mediciones en tiempo real. Para la medición del CO₂ se utilizó el equipo Q-TRACK que cuenta con un sensor infrarrojo no dispersivo y mide las concentraciones cada 2 s. Para las concentraciones de CH₄ y NMHC se utilizó el cromatógrafo *Young Lin (modelo 6500, Corea)*, este cromatógrafo utiliza Helio como gas de arrastre y aire seco e hidrogeno para el detector de ionización de flama (FID, por sigla en inglés). Se utilizan gases estándar de referencia para construir las curvas de calibración: 15,

100 y 200 ppm. También se utilizó nitrógeno como punto cero (0 ppm). El equipo cuenta con una columna empacada de 30 m de longitud. La toma de muestra (interfaz) esta enchaquetada y cuenta con una resistencia eléctrica para mantener la muestra caliente.

Aerosoles. La medición de material particulado de diámetro aerodinámico de 2.5 micras ($PM_{2.5}$), se midió con el método gravimétrico, el cual nos permite conocer la masa acumulada de una muestra. Este método se lleva a cabo mediante un ciclón cuyo flujo de operación es de 4 L/min. Cabe resaltar que este proceso se lleva a cabo por medio de muestreos isocinéticos, es decir que se intenta igualar la velocidad de los aerosoles con los de la muestra. En este proceso se utilizó el medidor de flujo *Defender 520* para calibrar el flujo hacia los ciclones. Los filtros utilizados son de fibra de vidrio, de 4 in de diámetro con 1 micrómetro de diámetro de poro.

Una vez que se tuvo la muestra, se determinó la masa de $PM_{2.5}$, para ello se utilizó la balanza semi micro-analítica (*OHAUS-EX225D*). Antes de cada set de pesaje se tiene que verificar dicha balanza, esto se realiza con ayuda del kit de masas estándar.

La preparación de los filtros se llevó a cabo dentro del cuarto de pesado, el cual debe estar en condiciones ambientales controladas a una temperatura de $23^{\circ}C \pm 2$ y una humedad relativa de $35\% \pm 5$, todo ello para asegurar un correcto pesaje de las muestras. Para estabilizar los filtros estos se dejaron expuestos en el cuarto de pesado previa y posteriormente a la toma de muestra, por al menos 48 horas.

Para el proceso de pesado se requirió de un desionizador marca *Sartorius* el cual se encarga de eliminar las cargas electronegativas que puedan contener los filtros y que no influyan en el peso de la muestra. Se utilizó antes de cada pesaje y se pasó sobre el filtro.

El carbono elemental suele confundirse o referirse como el carbono negro, sin embargo, la diferencia entre ellos es únicamente su aplicabilidad o su manera de medición, el carbono negro suele utilizarse en procesos atmosféricos en los cuales participa la radiación, mientras que el carbono elemental (EC, por sus

siglas en inglés), es aplicable a cuestiones de propiedades físicas y químicas de partículas carbonosas (López Orozco, 2018).

El carbono elemental, carbono negro u hollín como se le puede conocer, es un aerosol que se obtiene de la combustión incompleta de los combustibles fósiles principalmente, aunque se puede dar en todos los combustibles que contengan carbono (López Orozco, 2018). Lo que caracteriza al carbono elemental, es que tiene una gran capacidad de absorber la luz visible, lo que provoca una menor intensidad del albedo, lo cual conlleva a mantener una mayor cantidad de calor en la tierra, favoreciendo al calentamiento global; además es refractario, esto quiere decir que puede mantener su estabilidad química a muy altas temperaturas, aunque su tiempo de permanencia en la atmosfera es relativamente corto, pues únicamente permanece por unos días o semanas (Valdebenito Silva, 2017).

El carbono orgánico (OC, por sus siglas en inglés) se caracteriza por reflejar la luz solar hacia el espacio a diferencia del carbono negro, lo que contribuye al enfriamiento global del planeta (MacCarty et al., 2008).

El análisis para determinar el contenido de carbón (OC y EC) se realiza por el método termo óptico, utilizando un medidor de carbono por detección coulométrica modelo CM-150 marca *UIC*. En donde el análisis de la muestra se hace a través de la determinación de la concentración de dióxido de carbono (CO₂).

El método llevado a cabo para la obtención del carbono elemental y carbono orgánico (EC y OC) se realizó mediante el método termo óptico el cual se describe en el trabajo de López Orozco, (2018).

Para la obtención de los factores de emisión de los gases y aerosoles antes mencionados se utilizó la metodología descrita por Tinoco, 2017; en la cual se describe el método empleado para la evaluación de las emisiones en tiempo real de las emisiones intramuros.

En la Figura 12 se muestra la representación de la campana utilizada para la toma de muestras y extracción de las emisiones intramuros del LINEB.

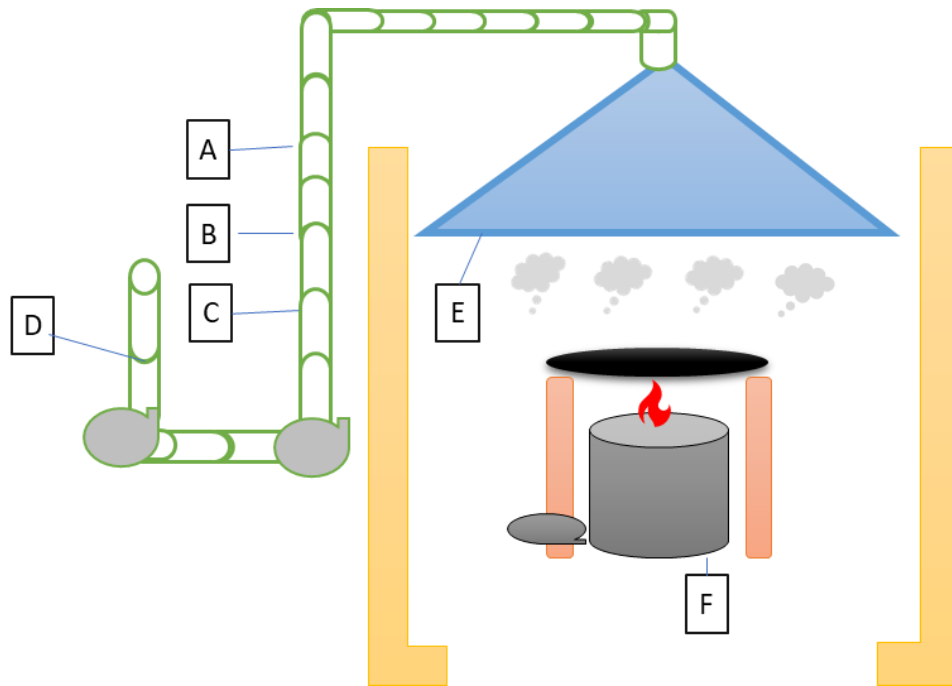


Figura 12. Representación del sistema de la campana para la separación y captura de las emisiones intramuros. Los puntos de muestreo para las emisiones fugitivas o intramuros se dan en A, B y C. Donde: A es el puerto de muestreo gravimétrico de $PM_{2.5}$; B es el puerto de muestreo para los gases de CO y CO_2 y; C es el punto de muestreo para la velocidad y temperatura del flujo. D representa la salida de la tubería para ventilar las emisiones intramuros. Mientras que E es la campana para capturar las emisiones intramuros y F el dispositivo evaluado (Fuente: creación propia).

Las características de esta campana es que está hecha de acero galvanizado, el cual resiste temperaturas altas y permiten fácilmente la toma de muestras, la campana cuenta con un tren de muestreo para los gases y aerosoles resultantes de la combustión. Los gases colectados en la campana tienen un flujo laminar lo cual permite tener un flujo unidireccional por la tubería donde se encuentran los mezcladores y puertos de muestreo (Ruíz García, 2018). En la Figura 13 se muestra el tren de muestreo empleado para la toma de muestras de las emisiones totales.

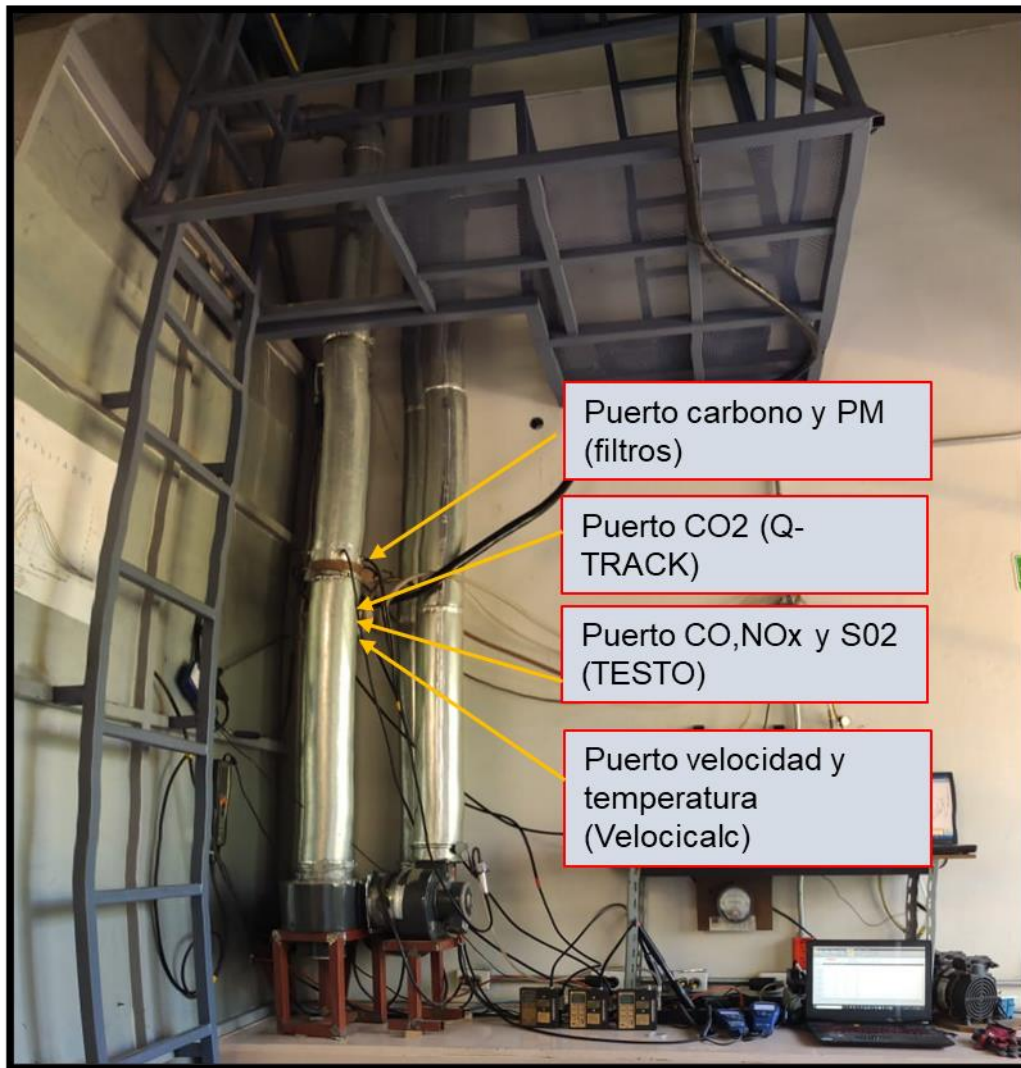


Figura 13. Tren de muestreo de emisiones totales.

3.4 Efectos netos de contribución al efecto invernadero.

Se calculó el CO_{2eq} para diversos escenarios donde se toma en cuenta un factor de no renovabilidad de la biomasa (fnrb) distinto. Por un lado, se calculó el CO_{2eq} por kg de tortilla preparada, mientras que se obtuvo también el CO_{2eq} por kg de pellet consumido, el cual sirvió para hacer las comparaciones correspondientes entre otros tipos de sistemas como los fogones a cielo abierto o las estufas eficientes de leña, especialmente las estufas “patsari”.

Para la realización del cálculo, se basó en los valores del potencial de calentamiento para cada gas, los cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de potencial de calentamiento global.

Valores de potencial de calentamiento global (GWP) para un horizonte a 100 años		
Emisión	GWP	Referencia
CO ₂	1	IPCC Fifth Assessment Report (AR5) 2014
CO	1.9	IPCC Fourth Assessment Report (AR4) 2007
CH ₄	28	IPCC Fifth Assessment Report (AR5) 2014
NMHC	12	Edwards and Smith, 2002
EC	680	MacCarty, et al., 2008
OC	-79	MacCarty, et al., 2008

Los gases que se tomaron en cuenta para el cálculo del CO_{2eq} fueron el CO, CH₄, NMHC, EC y OC. Cabe resaltar que no se tomó en cuenta el CO₂ dentro del cálculo ya que en este estudio se consideró que el CO₂ emitido por el gasificador era carbono neutral, es decir que prácticamente todo el CO₂ emitido se fijará de nuevo a la tierra, argumento que también apoya Bueno Lorenzo (2006) en su estudio, donde afirma que el balance global de emisión de CO₂ por un gasificador es cero o negativo ya que los cultivos energéticos fijan una cantidad de CO₂ mayor o igual a lo emitido por el dispositivo. Dichos cultivos energéticos tales como el de pino, agave o café, analizados en este estudio se consideran cultivos “sustentables” pues cada cosecha significa nuevas plantaciones y se recupera la deuda de dióxido de carbono emitida.

Sin embargo, se realizaron otros escenarios donde si se toma en cuenta el CO₂ además de los gases antes mencionados, estos escenarios se presentan en el anexo B. En dichos escenarios donde se tomó en cuenta el CO₂, se utilizó un factor de no renovabilidad de la biomasa (fNRB), el cual está basado en el estudio de Bailis et al. (2015) y donde se representa un porcentaje que no se fija a la tierra después del proceso de degradación térmica, en este estudio se calculó un factor aproximado para la biomasa forestal como resultado de la recolección directa de leña, dicho factor corresponde con la zona geográfica de donde fueron extraídas las biomásas, en este caso para el pellet de pino se utilizó un factor de 0.35 pues corresponde a la zona norte de México, mientras que para los pellets agrícolas se utilizó en algunos escenarios un factor de 0.25 correspondientes a las zonas centro y sur del país.

Además, se calcularon los valores correspondientes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por KWh emitidos por el ventilador del microgasificador mientras se estaban realizando las pruebas de cocinado. Para ello se tomó el factor de emisión del sistema eléctrico nacional (SEMARNAT, 2021) el cual fue de $0.494 \text{ KgCO}_{2\text{eq}}/\text{KWh}$. Dicho factor se multiplicó por la potencia del dispositivo (kW) y el tiempo de operación (h) para así obtener el valor correspondiente de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ correspondiente al uso de electricidad del sistema de ventilación.

3.5. Diseño de experimento y análisis estadístico.

Para todos los estadísticos y datos procesados de esta investigación se utilizó el paquete estadístico XLSTAT.

- Caracterización fisicoquímica de los combustibles: De acuerdo con los datos obtenidos se realizó únicamente un análisis descriptivo y comparativo de los valores resultantes de cada parámetro presentado.
- Desempeño energético: De acuerdo con los datos obtenidos de los parámetros de desempeño energético del microgasificador, se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni con un valor de alfa de 0.05 ($\alpha = 0.05$) para de este modo conocer si existen diferencias significativas entre cada parámetro.
- Emisiones resultantes de la combustión: De acuerdo con los datos obtenidos de los factores de emisión por masa de alimento preparado, se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni con un valor de alfa de 0.05 ($\alpha = 0.05$) al igual que para el desempeño energético con el fin de demostrar si se encuentran diferencias significativas entre cada tipo de pellet.
- Para el cálculo del $\text{CO}_{2\text{eq}}$ se utilizaron los valores del potencial de calentamiento global de cada gas (GWP) y en algunos escenarios se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni con un valor de alfa de 0.05 ($\alpha = 0.05$).

4. RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS COMBUSTIBLES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización físicoquímica de los pellets utilizados en este estudio, de manera que en la Tabla 9 se presenta el análisis proximal, donde se ilustran los valores de los porcentajes de humedad, de materia volátil, de carbono fijo y de cenizas.

Tabla 9. Análisis proximal de los pellets utilizados.

Tipo de pellet	% Humedad	% Materia Volátil	% Carbono fijo	% Cenizas
Pellet de Agave	7.58 ± 0.08	83.872 ± 0.24 *	11.19 ± 0.13	4.4 ± 0.02
Pellet de Café	9.65 ± 0.06	84.06 ± 0.66	17.77 ± 0.34	1.17 ± 0.02
Pellet de Pino	8.24 ± 0.02	Sin dato	Sin dato	1.66 ± 0.04

Nota: Los datos se expresan como promedio ± su desviación estándar, $n=3$ *Para el caso del % de la materia volátil en el pellet de agave, únicamente se utilizó una $n=2$.

Como se puede apreciar en la Tabla 9, los valores del análisis proximal de los pellets tanto agrícolas como forestales, dejan notar que en general son de buena calidad y que además se encuentran dentro de los valores estándares por la norma europea EN 14961-2 para el uso de pellets de residuos forestales de uso no industrial o residencial que se presenta en la Tabla 1. Únicamente el pellet de agave resultó fuera de un parámetro, el cual fue el contenido de cenizas, ya que este se encuentra con un valor más alto del estipulado por la norma, con un promedio de casi 5% del contenido de ceniza.

Cabe sobresaltar que el pellet de café fue el que tuvo un mayor contenido de humedad, sin embargo, éste no sobrepasó el 10% que establecen las normas de calidad de pellets, mientras que, para el resto de los valores, éstos se mantienen casi igual, sin diferencias apreciables.

Con base en dichos resultados se podría inferir que los pellets aquí estudiados no son de primera calidad (A1) según la norma, sin embargo, si pueden estar dentro de la categoría A2 y B.

Por otro lado, en la Tabla 10 se presentan los resultados tanto del poder calorífico superior como del poder calorífico inferior de los pellets utilizados en este estudio. Aquí podemos apreciar que el pellet de café es el que presenta los mayores valores tanto de poder calorífico superior (PCS) como del inferior, seguido del pellet de pino con un valor de 18.40 MJ/Kg para el PCS, mientras que el pellet de agave es el que presentó los menores valores para ambos poderes caloríficos. Sin embargo, estos valores no se separan tanto entre sí, y podemos inferir que estos valores se encuentran están dentro de la norma europea

EN14961-2, lo que asegura que los pellets agrícolas si pueden competir con los pellets forestales en el ámbito energético.

Tabla 10. Poder calorífico superior y poder calorífico inferior de los pellets.

Tipo de pellet	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
Pellet de Agave	17.09 ± 0.05	16.37 ± 1.5
Pellet de Café	19.61 ± 0.01	17.48 ± 0.01
Pellet de Pino	18.40 ± 0	Sin dato

Nota: Los datos se expresan como promedio ± su desviación estándar, $n=3$ a excepción del pellet de pino el cual se tomó una $n=1$.

Vale la pena mencionar que Camargo & Williams (2012) reportan en su estudio que el contenido de cenizas está estrechamente relacionado con el poder calorífico, si se tiene un alto porcentaje de cenizas, encontraremos por la tanto valores más bajos de por calorífico, ya que las cenizas dificultan la transmisión del calor. Este fenómeno se puede apreciar claramente en este estudio con el pellet de agave, encontrándose valores altos de cenizas y valores bajos de poder calorífico.

DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Para la presentación de los valores del desempeño energético del microgasificador se decidió representar los parámetros de tiempo de cocción, la tasa de quemado y la potencia del dispositivo, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de desempeño energético del microgasificador.

Tipo de pellet	Tiempo min	Tasa de quemado g/min	Potencia kW
Pellet pino	32.92 ± 5.10 ^{sd}	29.52 ± 5.10 ^{sd}	8.74 ± 1.50 ^{sd}
Pellet Agave	39.58 ± 1.35 ^{sd}	26.04 ± 0.95 ^{sd}	7.90 ± 0.27 ^{sd}
Pellet café	42.17 ± 3.89 ^{sd}	27.48 ± 2.46 ^{sd}	8.29 ± 0.78 ^{sd}

Nota: Los datos se expresan como promedio ± su desviación estándar, $n=5$.^{sd}= Sin diferencias significativas entre cada parámetro.

Según los resultados obtenidos en el estadístico, se obtuvieron para los tres parámetros una $p>0.05$, por lo que se determinó que no existen diferencias significativas (*sd*) entre cada parámetro presentado, es decir, indistintamente del tipo de pellet utilizado (pino, agave o café), se obtuvieron prácticamente los mismos valores energéticos en cuestión del tiempo de cocción, la tasa de quemado y de la potencia para la ecotecnología evaluada.

Sin embargo, a raíz de que el valor de la potencia para el caso del pellet de agave se mostró un poco por debajo de los otros valores de pellets de café y pino, se puede predecir que si se contaran con un mayor número de repeticiones, más grandes que una $n=5$ como en el caso de este estudio, se podría probablemente encontrar que se presenten diferencias significativas para el caso del pellet de agave, ya que éste muestra un menor poder calorífico que los otros pellets, además de que también contiene una mayor cantidad de cenizas en comparación con los pellets de pino y café.

Por otro lado, se requirieron en promedio 1.13 ± 0.09 kg de combustible seco (pellets agrícolas y forestales) para todas las pruebas de cocinado y con ello se realizaron en promedio 1.2 ± 0.08 kg de tortillas de comal, todo esto con 1.5 kg

de masa de maíz. Esto quiero decir que se encontró una relación 1:1 aproximadamente independientemente del tipo de pellet aquí estudiado.

Por lo tanto, indistintamente del tipo de pellet, el desempeño energético en el microgasificador se mantuvo relativamente constante, arrojándonos resultados muy parecidos en cuanto a tiempo, potencia y tasa de quemado. Con base en lo anterior se podría llegar a la conclusión que se puede utilizar cualquier tipo de los pellets aquí analizados y así satisfacer energéticamente la misma tarea de realizar tortillas de comal sin esperar cambios significativos en el desempeño del proceso.

Sin embargo, no hay que dejar de lado un punto importante dentro de estos parámetros, pues hay que recordar que para cada tipo de pellet se tuvo que encontrar la distancia adecuada del tope del microgasificador al comal (Tabla 7), resultando que para el pellet de pino y de café se debía dejar una distancia mayor (30 cm) a comparación con el pellet de agave (22 cm) pues que los pellets de pino y café fueron los que desprendían una flama mayor y más potente que sobrecalentaban el comal, esto se le atribuye a que estos tipos de pellets contienen valores más altos de PCS. Esta distancia es muy importante ya que determina la temperatura del comal, además de que entre mayor es la distancia del comal al tope del microgasificador, éste puede perder eficiencia. Además, es importante tenerlo en consideración ya que si no se hace de este modo se llegan a quemar las tortillas. Por lo que los valores de desempeño energético pueden estar influenciados también por esta distancia.

Además de los valores altos del poder calorífico del café, se encontró que el residuo del café, especialmente la cascarilla de este mismo contiene valores altos de lignina y celulosa lo que ha facilitado su conversión en azúcares simples y en alcoholes o etanol que es usado comúnmente como fuentes de biocombustibles (Ortiz & Cruz, 2016). Inclusive otros estudios como el de Rodríguez & Zambrano (2013) han resaltado las características fisicoquímicas de todos los residuos del café como una fuente de aprovechamiento energético, lo que podría asociarse con las razones por las que se apreció una flama muy alta en este tipo de pellet, similar al pellet forestal de pino.

EMISIONES RESULTANTES DE LA COMBUSTIÓN

Para la obtención de los resultados de las emisiones derivadas de la combustión, se representaron los factores de emisión de cada uno de los gases medidos por masa de alimento preparado en g/kg, tal como se muestra en la Tabla 12, es decir, se muestra cuantos gramos de cada gas se están emitiendo por cada kg de tortilla preparada en el microgasificador.

Tabla 12. Factores de emisión por masa de alimento preparado.

Tipo de pellet	CO ₂	CO	CH ₄	NMHC	PM _{2.5}	EC	OC
	g/Kg	g/Kg	mg/Kg	mg/Kg	g/Kg	mg/Kg	mg/Kg
Pellet pino	1464 ± 165.29ab	12 ± 5.14a	914 ± 208b	722 ± 287sd	14 ± 1.72a	0 ± 0a	5.81 ± 3.3a
Pellet Agave	1394 ± 101.69a	47 ± 24.86b	580 ± 268a	441 ± 269sd	31 ± 16.58b	0.64 ± 1.41ab	5.16 ± 2.26a
Pellet café	1620 ± 98.84b	40 ± 4.44b	503 ± 79a	317 ± 150sd	34 ± 1.66b	37 ± 33b	52 ± 25b

Nota: Los datos son porcentajes de una $n=5$ ± su desviación estándar. *sd*= Sin diferencias significativas entre cada parámetro. Diferentes letras significan diferencia significativa (Kruskal Wallis con prueba bilateral de Conover-Imán con corrección de Bonferroni, $\alpha=0.05$).

Según los resultados obtenidos en el estadístico, se obtuvieron para todos los gases, a excepción de los compuestos no metánicos (NMHC), una $p<0.05$, lo que quiere decir que si existen diferencias significativas entre cada tipo de pellet con relación a la emisión de gases.

Lo que hay que resaltar son las emisiones resultantes de cada tipo de pellet, en primer lugar, tenemos al CO₂, donde el pellet que más emisiones tuvo de este gas fue el pellet de café, sin embargo, no hubo mucha diferencia en comparación con los otros. Para el caso del CO, algo muy peculiar fue que los pellets agrícolas resultaron en una mayor cantidad de emisión de este gas en comparación con el forestal, situación que se debe tomar en cuenta al momento de hacer evaluaciones con categorías de impacto ambiental que contabilicen el CO, y a pesar de que los pellets agrícolas emitieron más CO, para el siguiente gas que es el metano (CH₄) ocurrió lo contrario, donde el pellet forestal de pino fue el que emitió un poco más metano que los pellets agrícolas. Para el caso del material

particulado (PM_{2.5}) hubo también una separación entre los tipos de pellet, pues los pellets que más emisiones tuvieron fueron los agrícolas, en tanto que el pellet forestal tuvo bajas emisiones de este parámetro.

Para el carbono elemental (EC) hubo una diferencia muy marcada entre cada tipo de pellet resultando tener los valores más altos el pellet de café, esto quiere decir que es el tipo de pellet que tuvo una combustión más incompleta a comparación de los otros dos, desprendiendo este tipo de carbono. De la misma manera, el pellet de café fue el que obtuvo los valores más altos de carbono orgánico, lo que significa que contribuye más al “enfriamiento” de la tierra, debido a que refleja más la energía solar hacia el espacio.

En la Tabla 13 se muestran los valores referentes a las tasas de emisión totales por cada contaminante, los cuales son prácticamente muy similares a los de la Tabla 12 en concentraciones, sin embargo, éstas se muestran para realizar las comparaciones correspondientes.

Tabla 13. Tasas de emisión totales.

	CO₂ g/min	CO g/min	CH₄ g/min	NMHC g/min	PM_{2.5} g/min	EC g/min	OC g/min
Pellet pino	51.88 ± 8.82	389 ± 98	32 ± 5	26 ± 12	482 ± 82	37 ± 82	65 ± 144
Pellet Agave	43.53 ± 2.15	1486 ± 826	18 ± 9	14 ± 8	980 ± 53	0.02 ± 0.04	0.16 ± 0.07
Pellet café	45.97 ± 4.23	1134 ± 203	14 ± 1	9 ± 3	969 ± 94	1.03 ± 0.9	1.51 ± 0.78

Nota: Los datos son porcentajes de una $n=5 \pm$ su desviación estándar.

Algo importante que ocurrió fue que se obtuvieron unos valores muy altos de material particulado (PM_{2.5}) en general para los tres tipos de pellet en comparación con lo que dicta la ISO/TR 19867-3:2018, la cual establece una tasa normalizada de 0.0027 g/min. Esto se le atribuye a que la potencia del ventilador del microgasificador era demasiada alta y no era posible controlar su potencia. Además de que los pellets agrícolas contienen una mayor cantidad de materia orgánica lo que facilita su volatilización, por ejemplo, el pellet de agave, el cual por su composición residual está formado por una gran cantidad de fibras gruesas (González García et al, 2005). Otros autores como Quiñones-Reveles

et al. (2021) y MacCarty et al. (2008) mencionan que las emisiones de material particulado derivadas de un gasificador (TLUD) están estrechamente relacionadas con factores como el tamaño, las características físicas del combustible, el diseño y el rendimiento del gasificador, por lo que cuando se tiene una mayor potencia y una acelerada combustión de la biomasa se reduce la relación aire-combustible, esto ocasiona una menor oxigenación y por ende una mayor producción de hollín y elementos contaminantes. Recordando de esta manera que el microgasificador evaluado llega a potencias de hasta 9 kW, mientras que los microgasificadores revisados en la literatura alcanzan potencias máximas de hasta 5 KW (Roth, 2011). Así mismo se puede relacionar con los finos sólidos provenientes de los pellets expulsados por el ventilador del microgasificador, recordando también que los pellets empleados no son de 1ra calidad (A1) como lo establece la norma europea EN 14961-2.

Así mismo se obtuvieron los factores de emisión por la energía liberada de los pellets (Tabla 14), los cuales permitieron compararlos con lo que indica la ISO/TR 19867-3:2018 (Tabla 3 y 4).

Tabla 14. Factores de emisión por energía liberada de combustible.

	CO ₂ g/MJ	CO g/MJ	CH ₄ mg/MJ	NMHC mg/MJ	PM _{2.5} g/MJ	EC mg/MJ	OC mg/MJ
Pellet pino	105 ± 1.5	0.83 ± 0.3	66 ± 11	53 ± 25	0.99 ± 0.1	0 ± 0	0.40 ± 0.18
Pellet Agave	107 ± 7.7	3.61 ± 1.9	69 ± 5	52.5 ± 25	2.38 ± 1.3	0 ± 0	0.40 ± 0.17
Pellet café	96 ± 0.8	2.37 ± 0.3	51 ± 20	41 ± 20	2.02 ± 0.1	0.04 ± 0.10	0.39 ± 0.17

Los datos son porcentajes de una $n=5$ ± su desviación estándar.

Para el caso del CO, se encontró que los niveles de concentración fueron adecuados a los dictados por la ISO/TR 19867-3:2018, donde se establece una tolerancia máxima ≤ 18.3 g/MJ de CO, cuya referencia es utilizada comúnmente en fogones a cielo abierto y valores de ≤ 3.0 g/MJ para estufas eficientes. Esto quiere decir que las emisiones de CO de cualquier tipo de pellet utilizado en este estudio están dentro de las concentraciones permitidas por la norma

internacional obteniendo un valor de 5, el cual se refiere al mejor desempeño en cuanto a emisiones de $PM_{2.5}$ y CO por energía liberada de combustible.

Mientras que en el caso del CH_4 se encontró un valor más alto en el pellet de pino (hasta 76 mg/MJ), esto se puede relacionar con lo que reportaron Quiñones-Reveles et al (2021), quienes indican que cuando una madera procesada no contiene corteza, ésta aumenta su poder calorífico, permitiendo la formación de metano en grandes proporciones.

CO_{2eq} Y MITIGACIÓN ASOCIADA

Enseguida se muestran los efectos netos de contribución al efecto invernadero entre los diferentes tipos de pellets utilizados correspondientes al CO₂ equivalente (CO_{2eq}) por kg de tortilla de preparada el cual contempla los siguientes gases: CO, CH₄, NMHC, EC y OC (Tabla 15).

Tabla 15. Factores de emisión de CO_{2eq} por Kg de tortilla preparada.

Tipo de pellet	CO g/kg	CH ₄ g/kg	NMHC g/kg	EC g/kg	OC g/kg	CO _{2eq} g/kg
Pellet pino	22.16	25.61	8.67	0.00	-0.46	55.98
Pellet Agave	89.28	16.25	5.29	0.44	-0.41	110.86
Pellet café	75.94	14.10	3.81	25.68	-4.15	115.38

Los datos son porcentajes de una n=5.

Como se puede apreciar en la Tabla 15, el pellet de pino fue el combustible que menos emisiones de CO_{2eq} obtuvo con 55.98 g/kg a comparación con el pellet de café el cual tuvo el mayor aporte con 115.38 g/kg de CO_{2eq} por kg de tortilla preparada. Los pellets agrícolas emiten una mayor cantidad de CO, resultado que afecta considerablemente a la suma del aporte total.

A continuación, en la Tabla 16, se presenta el aporte de CO_{2eq} por kg de pellet consumido.

Tabla 16. Factores de emisión de CO_{2eq} por kg de pellet consumido.

Tipo de pellet	CO g/kg	CH ₄ g/kg	NMHC g/kg	EC g/kg	OC g/kg	CO _{2eq} g/kg
Pellet pino	24.55	28.76	10.02	0.00	-0.50	62.83a
Pellet Agave	91.91	16.76	5.44	0.45	-0.42	114.13b
Pellet café	76.08	14.03	3.81	25.77	-4.16	115.52b

Los datos son porcentajes de una n=5. Diferentes letras significan diferencia significativa (Kruskal Wallis con prueba bilateral de Conover-Imán con corrección de Bonferroni, α=0.05).

A partir del estadístico empleado para estos valores, se encontraron diferencias significativas entre el pellet de pino y los pellets agrícolas, separándose en 2 grupos distintos.

En la Figura 14 se puede apreciar de manera clara la separación entre cada tipo de pellet y su valor de p asociado.

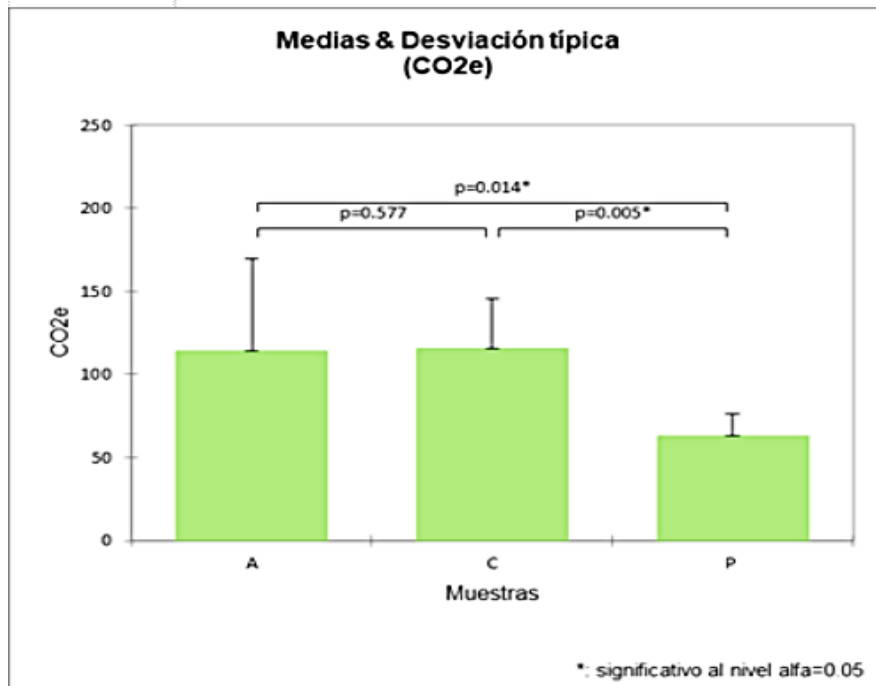


Figura 14. Medias y desviación típica de CO_{2eq}. (A: Pellet de agave, C: Pellet de Café, P: Pellet de Pino).

Lo que es importante mencionar aquí es que los pellets agrícolas fueron los que tienen los valores más altos de CO_{2eq}, lo que quiere decir que debido a sus emisiones de GEI contribuyen más al calentamiento global del planeta en comparación con el pellet forestal. Lo que significa que entre estos tres diferentes tipos de pellet y bajo este escenario, el pellet de pino es el que tiene un impacto menor a la atmósfera en lo que se refiere a emisiones de GEI.

Sin embargo, esto no quiere decir que los pellets agrícolas sean una mala opción para ser utilizados en tareas de cocción de alimentos en este tipo de tecnologías de combustión, pues como se puede apreciar en la Figura 15 donde se muestra además del aporte de CO_{2eq} de los combustibles utilizados en este trabajo, el aporte de dos fogones tradicionales de leña, donde los pellets agrícolas a pesar de tener los valores más altos en este trabajo se encuentran muy por debajo de los fogones de leña, lo que significa una mitigación asociada por el uso de pellets

agro-forestales de hasta 613 gCO_{2eq}/kg de pellet empleado. Sin embargo, es importante mencionar que en los estudios comparados (Figura 15) no se tomaron en cuenta los mismos gases de potencial de calentamiento global que en este estudio para el cálculo del CO_{2eq}. En el estudio de Johnson et al (2008), donde se comparan las estufas patsari se consideraron los siguientes gases: CO₂, CO, CH₄ y NMHC; aun así, bajo este mismo estudio se restó el valor del CO_{2eq} mostrado para tener una aproximación más cercana y pudiera ser más comparable con los gases tomados en cuenta en este trabajo los cuales fueron: CO, CH₄, NMHC, EC y OC, donde EC y OC no representan una diferencia significativa.

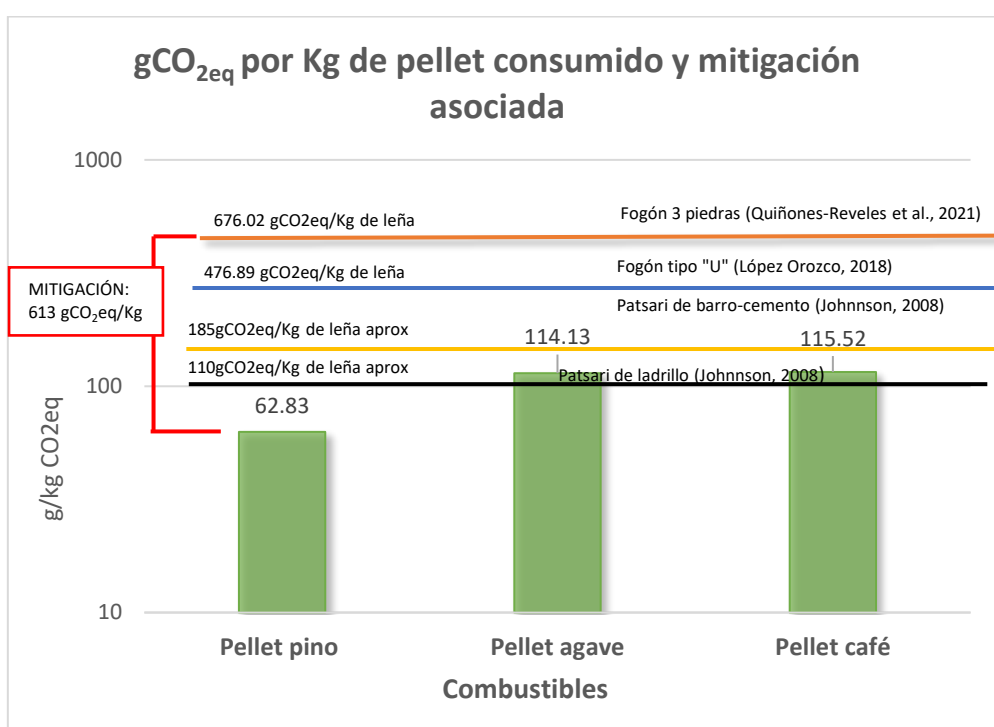


Figura 15. Comparación de emisiones de CO_{2eq} entre el microgasificador evaluado, estufas eficientes de leña y fogón de 3 piedras. Las líneas de color horizontal corresponden a las comparaciones de otros dispositivos de cocción. *Nota:* Los datos son promedios de una $n=5$.

Sumando un poco más al aporte real generado por el microgasificador, se obtuvo la contribución al efecto invernadero por el consumo eléctrico generado por el microgasificador específicamente por el uso del ventilador, en la Tabla 17 se muestran los resultados para cada tipo de pellet utilizado.

Tabla 17. Contribución de CO_{2eq} al efecto invernadero por consumo eléctrico.

Contribución al efecto invernadero por consumo eléctrico	
gCO _{2eq} /kWh	
Pellet pino	7.37*
Pellet agave	8.96*
Pellet café	9.33*

*Nota: Los datos son promedios de una n=5.

Como se puede apreciar los valores por cada tipo de pellet no varían mucho, esto se debe a que el equipo genera una potencia constante (de 28.5 w promedio), lo único que varía es el tiempo de encendido del ventilador del microgasificador, el cual está relacionado con el tiempo de cocción de las tortillas entre cada tipo de pellet.

Estos valores pueden sumárseles a la contribución de CO_{2eq} para cada escenario, sin embargo, no representan una diferencia notoria, ni una carga excesiva para el cálculo total a pesar del fuerte huella de carbono que presenta la electricidad en el contexto mexicano.

5. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica de los pellets agrícolas (análisis proximal) demostró que este tipo de pellets cumple con los valores estándares propuestos por la norma europea EN 14961-2 para el uso de pellets de residuos forestales para uso no industrial, lo que determina que tanto el pellet de agave como el de café pueden ser utilizados en equipos de combustión para fines de cocción de alimentos de forma análoga al pellet forestal de pino.
- El desempeño energético del microgasificador se comportó de manera similar al utilizar los tres diferentes tipos de pellets empleados en este estudio, lo que significa que indistintamente del tipo de pellet utilizado se pueden lograr valores de desempeño energético similares, los cuales son suficientes para satisfacer la tarea de cocción de tortillas.
- Técnica, energética y ambientalmente es factible utilizar este microgasificador de biomasa a base de pellets agrícolas o forestales para satisfacer la tarea de elaborar tortillas de comal.
- Existen diferencias significativas en cuanto a las emisiones de CO_{2eq} generadas por cada tipo de pellet en el microgasificador y con relación a los fogones tradicionales de leña.
- Los pellets agrícolas resultaron en emitir una alta cantidad de CO y de PM_{2.5} (g/min) lo que quiere decir que futuras investigaciones deberían estudiar a mayor profundidad su uso y viabilidad como opción para satisfacer tareas de cocción de alimentos bajo el escenario aquí presentado pues estos compuestos se asocian directamente a la afectación de la salud de las personas, además de que están sobre los límites que dicta la norma.
- Los pellets agrícolas tienen una contribución mayor al efecto invernadero que el pellet forestal, sin embargo, los valores demuestran que están muy

por debajo que los fogones tradicionales de leña, asociando sobre todo a una mitigación de más de $600\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg}$ de pellet por el uso de este microgasificador de biomasa. A pesar de ello y bajo los supuestos y condiciones en que se utilizaron los pellets agrícolas de este trabajo, no se recomienda utilizarlos para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal debido a sus altos valores de material particulado ($\text{PM}_{2.5}$) y de monóxido de carbono (CO) los cuales afectan considerablemente la salud de los usuarios.

- El pellet forestal de pino resulta tener un mejor desempeño en cuanto a emisiones dentro del microgasificador para satisfacer la tarea de elaborar tortillas de comal.

RETOS, LIMITANTES Y BENEFICIOS

1. No existe una recomendación sobre la distancia entre el comal y el gasificador, por lo que se apreció que para cada tipo distinto de pellet utilizado en este trabajo se debía ajustar la distancia adecuada para que el calor entregado por el microgasificador permitiera cocinar de mejor manera las tortillas de comal, pues éstas tienen un rango de temperatura donde se alcanza el punto de cocción.
2. Otro reto importante fue aislar el calor y flamas hacia el usuario, por lo que se utilizó un material común en las comunidades, colocando alrededor del microgasificador bloques de concreto para contener el calor y el fuego. Los bloques permitieron modificar la altura de la flama en los pellets evaluados.
3. Una observación y limitante importante es la temperatura y la eficiencia del dispositivo, ya que la temperatura que puede llegar a ofrecer el microgasificador se ve reducida al incrementar la distancia entre el tope del microgasificador al comal por ende el dispositivo puede llegar a disminuir su eficiencia real.
4. Otro reto y limitante en este trabajo fue la situación que se está viviendo aún por la pandemia y la contingencia sanitaria, que llevó a modificar la agenda de trabajo e impidió avanzar como se hubiera deseado. Además de que por ello se tuvo que requirió realizar algunos ajustes al trabajo adecuándose a la situación.

RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis elemental para conocer la composición química de los combustibles y poder relacionarlo con los valores arrojados en los resultados.
- Se recomienda rediseñar ciertas partes del gasificador:
 - Un ventilador para el cual sea posible controlar su potencia.
 - Una protección o recubrimiento exterior para proteger al usuario de las chispas y el calor desprendido por el dispositivo.
 - Un difusor de flama para que el calor no se concentre únicamente en el centro del comal y las temperaturas se puedan homogeneizar en todo el espacio.
- Realizar un experimento similar mediante la misma metodología aquí descrita, pero con un mayor número de muestras, así como diferentes tipos de pellets agroforestales y realizar medición de parámetros de SO₂ y NO_x para tener un mejor análisis en cuanto a impactos a la salud y a la atmósfera.
- Realizar un análisis económico (costo-beneficio) para conocer la factibilidad socioeconómica de utilizar este tipo de tecnologías de combustión mediante estos biocombustibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, P. Reed, T. & Weber, P. (2007). *Micro-Gasification: What it is and why it Works*. Boiling Point No 53 (pp. 35-37).

Arizaga, S. L. M. (2020). Evaluación del uso de residuos forestales de pino y encino en forma de pellet para satisfacer tareas de calefacción: mitigación, calidad del aire y ahorros energéticos. (Tesis de licenciatura). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Pátzcuaro, Michoacán.

Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266-272.

Barbieri, J., Colombo, E., Mungwe, J. N., Riva, F., Berizzi, A., Bovo, C., ... & Adhikari, R. S.f. Directrices sobre tecnologías sostenibles para la utilización de los alimentos en contextos humanitarios y asentamientos informales.

Belonio, A. T. (2005). Rice husk gas stove handbook. Appropriate Technology Center. *Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University, Iloilo City, Philippines, 1-155.*

Blanco, S., Cárdenas, B., Maíz, P., Berrueta, V., Masera, O., & Cruz, J. (2012). Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un Programa de Intervención Masiva en México. *Informe Final. Instituto Nacional de Ecología. Versión actualizada septiembre de 2012.*

Brandin, J., & Tunér, M. (2011). *Small Scale Gasification: Gas Engine CHP for Biofuels*. <http://rembio.org.mx/newsite/wpcontent/uploads/2020/10/SmallScaleGasification.pdf>

Bueno Lorenzo, M. (2006). Estudio de alternativas para la electrificación rural en la zona de selva del Perú.

Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., Vega-Nieva, D. J., Goche-Telles, J. R., Corral-Rivas, J. J., Prieto-Ruíz, J. A., & Solis-Moreno, R. (2015). Densificación energética por torrefacción de la biomasa vegetal. *Biocombustibles sólidos*, 262-183.

Camargo, N. & Williams, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34),142-156. [fecha de consulta 23 de abril de 2021]. ISSN: 0123-921X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257024712012>

Castán Broto, V., & Kirshner, J. (2020). Energy access is needed to maintain health during pandemics. *Nature Energy*, 5(6), 419–421. doi:10.1038/s41560-020-0625-6

Castro, J. (2011). Perspectivas de la demanda energética global. *Petrotecnia*, 1, 54-70.

Chum, H., Faaij, A. P. C., Moreira, J. R., & Junginger, H. M. (2011). Bioenergy. Clean Cooking Alliance. S.f. Focus Countries. Recuperado el 19 de mayo de 2020 de: <https://www.cleancookingalliance.org/country-profiles/focus-countries/>

Clean Cooking Alliance (2020). 2019 ANNUAL REPORT. Obtenido el 04 de agosto de 2020 de <https://www.cleancookingalliance.org/reports2/2019AnnualReport/CCA-annual-report-2019.pdf>

Corredor Becerra, O. F. (2008). *Evaluacion Del Potencial Energetico De La Biomasa Residual Proveniente De Cultivos Energeticos* (Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Quimica).

Cruz, Y. Y. P., & Martínez, P. C. C. (2015). Cambio climático: bases científicas y escepticismo. *Cultura Científica y Tecnológica*, (46).

De Lira, I. O. H., Hernández, L. E. M., López, A., Villanueva, A. R. M., Gadi, S. K., & Balagurusamy, N. AVANCES, RETOS Y PERSPECTIVAS DE BIOENERGÍA EN MÉXICO. *SERIEPONENCIAS*, 69.

Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., & Toscano, G. (2014). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel*, 135, 9-14.

EPA. (s.f). *Clean Cookstoves*. United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 19 de marzo de 2020 de: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/clean-cookstoves>

Fierros Peraza, O. (2019). Evaluación de un microgasificador de biomasa adaptado a una estufa de leña para aplicación en comunidades rurales de México (Tesis de grado).

Fournel, S., Palacios, J. H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M., & Savoie, P. (2015). Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 247-259.

García, C. A., Riegelhaupt, E., & Maser, O. (2013). Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 93-103.

García, C. A., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Maser, O. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 545-552.

González García, Yolanda, & González Reynoso, Orfil, & Nungaray Arellano, Jesús (2005). Potencial del bagazo de Agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis*, (3),0.[fecha de consulta 23 de abril de 2021]. ISSN: . Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000314>

Gutiérrez Llerena, J., Riegelhaupt, E. & Catana, A. (2015). *Prueba De Concepto Quemadores De Biomasa Residual Tipo TLUD*.

Hernández, J. D. A. (2014). Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. *Informador técnico*, 78(1), 12-24.

Hernández-Flórez, L. J., Aristizabal-Duque, G., Quiroz, L., Medina, K., Rodríguez-Moreno, N., Sarmiento, R., & Osorio-García, S. D. (2013). Contaminación del aire y enfermedad respiratoria en menores de cinco años de Bogotá, 2007. *Revista de Salud Pública*, 15, 552-565.

Improved Biomass Cooking Stoves. 2008. MJA Biomass Gas Stove. Recuperado el 19 de mayo de 2020 de: <https://stoves.bioenergylists.org/taxonomy/term/1651>

ISO/TR 19867-3:2018. Clean cookstoves and clean cooking solutions- Harmonized laboratory test protocols— Part 3: Voluntary performance targets for cookstoves based on laboratory testing.

ISO 18134-3:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general.

ISO 18122:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas.

ISO 18125:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.

ISO 18123:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil.

ISO (International Organization for Standardization (2020, Septiembre 15).ISO/TR 19867-3:2018. ISO. <https://iso.org/standard/73935.html>

Johnson, M., Edwards, R., Alatorre Frenk, C., & Masera, O. (2008). In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1206–1222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>

Jiménez, R. D., Soriano, V. B., & Cerutti, O. M. (2011). ESTUFAS DE LEÑA. *Red Mexicana de Bioenergía*.

KIRUBAKARAN V, SIVARAMAKRISHNAN V, R. NALINI, SEKAR T., M PREMALATHA, SURAMANIAP. (2007). A REVIEW ON GASIFICATION OF BIOMASS. *Renewable y Sustainable Energy Reviews* vol 28 pag. 612-616

López Orozco, M. (2018). 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 de maestría en ciencias en ingeniería química). Universidad Michoacana De San Nicolas de Hidalgo.

MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., & Roden, C. (2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for sustainable development*, 12(2), 56-65.

Marcos, F. & Camps, M. 2002. Biocombustibles Sólidos Densificados. *Madrid, España. Mundi-prensa. 154 p.*

Martin, R. M. (2008). Deforestación, cambio de uso de la tierra y REDD. *Unasylva*, 59(230), 3-11.

Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., ... & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas. *Red Mexicana de Bioenergía, AC, México, 7-8.*

Masera, O., Riojas-Rodríguez, H., Pérez-Padilla, R., Serrano-Medrano, M., Schilman, A., Ruiz-García, V., ... & Berrueta, V. (2020). Vulnerabilidad a COVID-19 en poblaciones rurales y periurbanas por el uso doméstico de leña. *Gobierno de México.*

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

Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. R. (2017). 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*, 41, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>

Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., ... & Masera, O. (2019). Understanding household energy transitions: From evaluating single cookstoves to “clean stacking” alternatives. *Atmosphere*, 10(11), 693.

Moreno, J. A. O., Cerutti, O. R. M., & Gutiérrez, A. F. F. (2014). *La ecotecnología en México*. IMAGIA.

Modi, V., McDade, S., Lallement, D., & Saghir, J. (2005). Energy Services for the Millennium Development Goals. *Energy services for the millennium development goals.*

Na, B. I., Ahn, B. J., & Lee, J. W. (2015). Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction. *Wood science and technology*, 49(2), 257-272.

Novelo, Victoria y Ariel García. (1987). *La tortilla: alimento, trabajo y tecnología*. Complementos del seminario de problemas científicos y filosóficos. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Ochoa, R. (s.f.). *Pobreza energética en América Latina*. Recuperado en mayo 11 de 2021 de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36661/S2014039_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M., & Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of Pellets from Three Forest Species: From Raw Material to End Use. *Forests*, 12(4), 447.

Ravindra, K., Kaur-Sidhu, M., Mor, S., Chakma, J., & Pillarisetti, A. (2021). Impact of the COVID-19 pandemic on clean fuel programmes in India and ensuring sustainability for household energy needs. *Environment International*, 147, 106335. doi:10.1016/j.envint.2020.106335.

Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO). (01 de marzo de 2019). Obtenido el 04 de agosto de 2020 de <https://rembio.org.mx/se-publica-vigencia-norma-mexicana-nmx-q-001-normex-2018-estufas-que-funcionan-con-lena/>

Díaz Jiménez, R., Berrueta Soriano, V., Masera Cerutti, O. (2011). ESTUFAS DE LEÑA. Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO).

REN21, R. (2020). *Global Status Report, 2020*.

Rodríguez, N., & Zambrano, D. A. (2013). *Los subproductos del café: fuente de energía renovable*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

Roth, C. (2011). Micro gasification: cooking with gas from biomass. *GIZ HERA Poverty-oriented Basic Energy Service*.

Roth, C., Anderson, P., McLaughlin, H., Thomlinson, T., & Wilson, K. (2014). *Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass*. GIZ.

ROWLAND, S. 2010. Design and testing of a small-scale Updraft gasifier for gasification of Eastern redcedar, Tesis de maestría en Ciencias. Universidad del estado de Oklahoma.

Ruiz, V. M. G. (2018). Evaluación comparativa del desempeño energético, emisiones intramuros y a la atmosfera de diferentes modelos de estufas eficientes de leña. (tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma De México. Programa de maestría y doctorado en ingeniería energía-energía y medio ambiente. México, Ciudad de México.

Sadaka, S., & Negi, S. (2009). Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. *Environmental Progress & Sustainable Energy: An Official Publication of the American Institute of Chemical Engineers*, 28(3), 427-434.

Segura, C. (2007). Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión.

Schiffer, A. (2020). Reframing energy access. *Reframing Energy Access*, 109–115. doi:10.4324/9780429458699-7

Schramski, J. R., Gattie, D. K., & Brown, J. H. (2015). Human domination of the biosphere: Rapid discharge of the earth-space battery foretells the future of humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(31), 9511-9517. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508353112>.

Segura, C. (2007). Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión.

SEMARNAT. (2021). FACTOR DE EMISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2020. Recuperado en mayo 11 de 2021 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf

Singh, T., Ravindra, K., Sreekanth, V., Gupta, P., Sembhi, H., Tripathi, S. N., & Mor, S. (2020). Climatological trends in satellite-derived aerosol optical depth over North India and its relationship with crop residue burning: Rural-urban contrast. *Science of the Total Environment*, 748, 140963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140963>

Suarez Velasquez, H. A., & Meza Hernández, A. Y. (2013). Desarrollo De Un Prototipo De Cocina De Gas Basada En La Gasificación De Biomasa Para La Cocción De Alimentos (Tesis doctoral, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Mecánica).

Támara Suárez, F.T. (2012). Fabricación y evaluación de estufa mejorada de plancha 16" x 24", con cámara de combustión microgasificadora (T-LUD), para comparación con codo rocket. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 26 p.

Technology Exchange Lab (TEL). S.f. Sampada ELFD Smokeless Stove. Recuperado el 19 de mayo de 2020 de <https://www.techxlab.org/solutions/appropriate-rural-technology-initiative-sampada>

Ortiz, R. A. A. & Cruz, J. D. M. (2016). Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.

Tinoco, J. C. V. (2017). Determinación de las emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes CO y pm2.5 por el uso de la estufa patsari, mediante la prueba de ebullición de agua WBT. (Tesis de maestría). Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. Morelia Michoacán.

Torjada, J. F., Castell, J. G., López, J. A., Domínguez, F. G., Ortega, J. A., & Berbel, O. (2001). Enfermedades asociadas a la polución atmosférica por combustibles fósiles. *Aspectos pediátricos. Rev Esp Pediatr*, 57(3), 213-225.

Turare, C. (1997). Biomass Gasification-Technology and Utilization. *Artes Institute, Universidad de Flensburg, Alemania*.

URIEN PINEDO, A. N. D. R. E. A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual.

Valdebenito Silva, V. A. (2017). Determinación de emisiones de carbono negro a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel. (tesis de

ingeniería). Universidad Técnica Federico Santa María Departamento De Ingeniería Mecánica. Santiago, Chile.

Wöhler, M., Jaeger, D., Reichert, G., Schmidl, C., & Pelz, S. K. (2017). Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable energy*, 105, 66-75.

World Health Organization. (2014). *WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion*. World Health Organization.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.

ANEXOS

A. Equipos de medición.

Gracias al LINEB y mediante los equipos profesionales con los que cuentan, fue posible realizar esta investigación, a continuación, se presentan los materiales utilizados.

Velocicalc (monitor de velocidad y temperatura):

Mediante este equipo podemos conocer la velocidad y la temperatura del flujo que pasa por la tubería en tiempo real.



Figura 16. Velocicalc

Q-TRACK (monitor de la concentración de CO y CO₂): Este aparato permite conocer las concentraciones en tiempo real de CO y CO₂, además de la temperatura del flujo.



Figura 17. Q-TRACK.

TESTO (monitor de la concentración de CO₂ y de NO_x): Mediante este aparato es posible conocer en tiempo real las concentraciones de NO_x y de CO₂.



Figura 18. TESTO.

Sistema gravimétrico PEMS: Este sistema permite obtener las muestras de las concentraciones del material particulado, el cual se caracteriza por una bomba de succión de 16.7 L/min del tren de muestreo o tubería de las emisiones intramuros, además de un ciclón o impactador de partículas para separar PM_{2.5}.; y un filtro de fibra de vidrio de 4 pulgadas de diámetro.



Figura 19. Sistema Gravimétrico PEMS.

Bombas de succión: Se utilizaron estas dos bombas para obtener la succión de la toma del tren de muestreo de las emisiones intramuros y de esta forma obtener las muestras del ciclón de 2.5 μm y del Q-track. Para el primero el flujo debe ser de 4 L/min, mientras que para el segundo deben ser 2 L/min.



Figura 20. Bombas de succión.

Medidor de flujo (Defender 520): El medidor del flujo nos permite calibrar el flujo de succión de las bombas de succión.

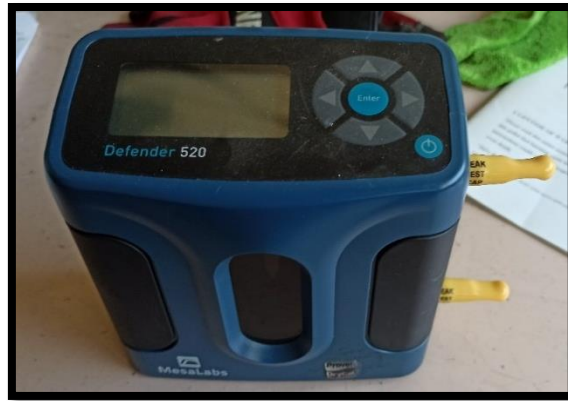


Figura 21. Medidor de flujo.

Wattmetro: Este dispositivo nos permite medir el consumo eléctrico en tiempo real de cualquier aparato que requiera corriente eléctrica.



Figura 22. Wattmetro.

Cromatógrafo Young Lin (modelo 6500): Este equipo es un sistema analítico el cual permite conocer las concentraciones de metano (CH_4) y de hidrocarburos ligeros como el butano, propano, etano, acetileno, propileno, entre otros.



Figura 23. Cromatógrafo.

Horno de secado esmaltado digital (Novatech HS60-ED): Gracias al horno de secado es posible eliminar el exceso de humedad de nuestras muestras ya que este equipo puede llegar a temperaturas de hasta 350°C.



Figura 24. Horno de secado esmaltado digital.

Desecador hermético: Mediante el desecador es posible mantener las muestras en un ambiente libre de humedad, con la finalidad de no ocasionar cambios en los parámetros a medir.



Figura 25. Desecador hermético.

Mufla (Novatech): Gracias a la mufla es posible realizar caracterización de % de volátiles, % de cenizas, así como determinación de humedad pues este aparato puede llegar a temperaturas de hasta 1100°C.



Figura 26. Mufla.

Almacén de filtros: Una vez obtenidas las muestras de los filtros para PM_{2.5} inmediatamente se traspan a este almacén donde se crea un ambiente libre de humedad gracias a las bolitas de silica contenidas en la parte inferior ya que mantienen los filtros en condiciones adecuadas para su posterior pesaje.



Figura 27. Almacén de filtros.

Báscula semi micro-analítica (OHAUS-EX225D): Con esta balanza es posible pesar las muestras de los filtros de 4 pulgadas (fibra de vidrio) así como las muestras para la caracterización del combustible. Tiene una exactitud de 0.00001 g mientras que su capacidad mínima es de 0.82 mg y su capacidad máxima va de los 120 g a los 220 g.



Figura 28. Báscula semi micro-analítica.

Kit de masas estándar: Gracias al Kit de masas estándar es posible calibrar las básculas analíticas y corroborar su exactitud mediante masas estándar con los siguientes pesos: 0.001g, 0.002g, 0.005g, 0.01g, 0.02g, 0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.5g, 1g, 2g y 5g.



Figura 29. Kit de masas estándar.

Filtros de fibra de vidrio y de cuarzo: Para conocer la cantidad de $PM_{2.5}$ contenida en las muestras se utilizaron los filtros de fibra de vidrio de 4 pulgadas (A), mientras que para conocer la cantidad de carbono orgánico y carbono elemental se utilizaron los filtros de cuarzo (B).



Figura 30. Filtros de fibra de vidrio y de cuarzo.

Desionizador (Sartorius): La utilidad del desionizador es el de eliminar cargas electroestáticas por medio de un choque eléctrico, se utiliza antes y después de pesar cada filtro, de esta manera se puede evitar el sesgo en los pesajes por cargas en las muestras.



Figura 31. Desionizador.

Termómetro digital de contacto (Fluke 54-IIIB): Con este termómetro es posible medir la temperatura de un cuerpo mediante contacto por medio de un termopar, éste puede medir temperaturas de hasta 1767°C según el fabricante.



Figura 32. Termómetro digital de contacto.

Calorímetro (Parr 6100). Mide el poder calorífico superior de muestras de biomasa.



Figura 33. Calorímetro.

ANEXO B

Tablas de cálculo de CO₂eq presentadas para distintos escenarios.

Tabla 18. Tasas de emisión de CO₂eq (g/min). (Se toma en cuenta el CO₂ y un factor de no renovabilidad de la biomasa (fnrb)).

Tipo de pellet	CO ₂ g/min	CO g/min	CH ₄ g/min	NMHC g/min	EC g/min	OC g/min	CO ₂ eq g/min
Pellet pino	18.16	0.74	0.89	0.32	25.08	-5.11	40.06
Pellet Agave	10.88	2.82	0.51	0.16	0.01	-0.01	14.39
Pellet café	11.49	2.17	0.40	0.10	0.70	-0.12	14.74

Los datos son porcentajes de una $n=5$. Fnrb pellet pino: 0.35/ fnrb pellet agave: 0.25/ fnrb pellet café: 0.25

Tabla 19. Tasas de emisión de CO₂eq (g/min). (No se toma en cuenta el CO₂)

Tipo de pellet	CO g/min	CH ₄ g/min	NMHC g/min	EC g/min	OC g/min	CO ₂ eq g/min
Pellet pino	0.74	0.89	0.32	25.08	-5.11	21.91
Pellet Agave	2.82	0.51	0.16	0.01	-0.01	3.50
Pellet café	2.17	0.40	0.10	0.70	-0.12	3.25

Los datos son porcentajes de una $n=5 \pm$ su desviación estándar.

Tabla 20. Factores de emisión de CO₂eq por kg de pellet consumido (g/kg). (Se toma en cuenta el CO₂ y un Fnr_b).

Tipo de pellet	CO ₂ g/kg	CO g/kg	CH ₄ g/kg	NMHC g/kg	EC g/kg	OC g/kg	CO ₂ eq g/kg
Pellet pino	577.65	24.55	28.76	10.02	0.00	-0.50	640.48
Pellet Agave	125.55	91.91	16.76	5.44	0.45	-0.42	239.68
Pellet café	141.35	76.08	14.03	3.81	25.77	-4.16	256.87

Los datos son porcentajes de una $n=5$. Fnr_b pellet pino: 0.35/ Fnr_b pellet agave y café: 0.25

Tabla 21. Factores de emisión de CO₂eq por kg de pellet consumido (g/kg). (Se toma en cuenta el CO₂ y un Fnr_b sólo para el pellet de pino).

Tipo de pellet	CO ₂ g/kg	CO g/kg	CH ₄ g/kg	NMHC g/kg	EC g/kg	OC g/kg	CO ₂ eq g/kg
Pellet pino	577.65	24.55	28.76	10.02	0.00	-0.50	640.48
Pellet Agave	0.00	91.91	16.76	5.44	0.45	-0.42	114.13
Pellet café	0.00	76.08	14.03	3.81	25.77	-4.16	115.52

Los datos son porcentajes de una $n=5$. Fnr_b pellet pino: 0.35