



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN  
ENERGÍAS RENOVABLES**

## **T E S I S**

**“EVALUACIÓN DE UNA ESTUFA ECOLÓGICA  
DE DOBLE COMBUSTIÓN EN CONDICIONES  
REALES DE OPERACIÓN, IMPLEMENTADA EN LA  
COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO DEL MAR,  
OAXACA”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS  
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

**PRESENTA  
ING. CHRISTIAN IVÁN ARREOLA GÓMEZ**

**DIRECTORES  
MTRO. ÓSCAR MARTÍNEZ AGUIRRE  
DRA. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO**



**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Marzo del 2025**



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## SECRETARÍA ACADÉMICA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 27 de marzo de 2025

Oficio No. SA/DIP/0280/2025

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**C. Christian Iván Arreola Gómez**

**CVU: 1271808**

Candidato al Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables

UNICACH

Presente

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **EVALUACIÓN DE UNA ESTUFA ECOLÓGICA DE DOBLE COMBUSTIÓN EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN, IMPLEMENTADA EN LA COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO DEL MAR, OAXACA** cuyo Director de tesis es el Mtro. Oscar Martínez Aguirre (CVU: 596568) y Co-Directora la Dra. Yanhsy Hernández Portillo (CVU: 596509) quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

**Atentamente**  
**"Por la Cultura de mi Raza"**

**Dra. Dulce Karol Ramírez López**  
**DIRECTORA**



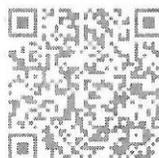
**DIRECCIÓN DE  
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

C.c.p. Dr. José Francisco Pola Albores, Director del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.  
Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño, Coordinador del Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.  
Archivo/minutario.

EPI/DKRI/hxb/ljgp/gtr

**2025, Año de la mujer indígena**  
**Año de Rosario Castellanos**

Ilustración: Noé Zenteno



Ciudad Universitaria, libramiento norte  
poniente 1150, col. Lajas Maciel C.P. 29039.  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México  
[investigacionyposgrado@unicach.mx](mailto:investigacionyposgrado@unicach.mx)

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por las enseñanzas, consejos, apoyo y motivación que me han brindado durante toda mi vida. A mi hermana Hannia Anette, quien me ha acompañado durante la mayor parte de mi formación académica y me ha brindado ánimos para cumplir mis metas y objetivos. A mi tía Araceli, quien con cariño me ha acogido durante ocho años en su hogar y nunca me ha negado una porción del sustento diario. A mi difunto tío Bacilio, con quien siempre pude contar durante el tiempo que compartimos. A mis primos Yamileth, Erick y Bacilio, con quienes he vivido diversas experiencias que me han ayudado a crecer como persona.

A mis tutores, Mtro. Óscar Martínez Aguirre y Dra. Yanhsy Hernández Portillo, por guiarme desde mi incursión en el área de las estufas ecológicas, así como por sus invaluable enseñanzas durante la redacción de mis tesis de licenciatura y maestría. Asimismo, agradezco su contribución a mi desarrollo personal y profesional. Integrarme a su equipo de trabajo ha sido una de mis mejores experiencias.

A la familia beneficiaria de la tecnología, ya que, sin su disposición y apoyo, la realización de este trabajo no hubiese sido posible.

A mis compañeros del programa de Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables (MMYSER), por su sincera amistad y apoyo tanto personal como profesional, así como por las experiencias compartidas durante la licenciatura y/o el posgrado.

Al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), por las facilidades brindadas para desarrollar este proyecto mediante el préstamo de la instrumentación y herramientas necesarias. Al personal académico, administrativo y de higiene, por el apoyo recibido durante clases, trámites y demás procesos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría mediante la beca nacional que se me otorgó.

## RESUMEN

Las estufas ecológicas son tecnologías eficientes diseñadas para cocinar alimentos que permiten mitigar la contribución asociada al uso de fogones tradicionales a problemas medioambientales como la deforestación de bosques, la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, entre otros. Asimismo, estos dispositivos reducen los riesgos de contraer enfermedades provocadas por la exposición a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tales como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), entre otros [1 - 6].

En México se han desarrollado e implementado múltiples tipos de estufas ecológicas como estrategia para mejorar la calidad de vida de los usuarios. Actualmente, los modelos instalados integran diversas formas geométricas y materiales térmicos que aumentan la eficiencia del proceso de combustión, lo cual permite un ahorro de combustible en comparación con dispositivos tradicionales. Paralelamente, estas tecnologías incorporan chimeneas que expulsan el humo y los gases liberados durante la combustión fuera de las áreas de cocinado, lo que reduce los riesgos para la salud de los usuarios, asociados al contacto con estas emisiones. Otro beneficio importante es la mitigación del impacto ambiental derivado del aprovechamiento ineficiente de la biomasa y de la contaminación del aire [1, 2, 4, 7, 8].

En el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) se ha desarrollado una tecnología denominada "Vilma", diseñada considerando las necesidades y preferencias de usuarios del sureste de México. Actualmente, este modelo se ha implementado en diversas regiones de Oaxaca y Chiapas. En este trabajo se llevó a cabo la evaluación en campo de una estufa ecológica Vilma con el propósito de medir su desempeño en un entorno real de funcionamiento, en comparación con un fogón tradicional. Para ello se realizaron diversas pruebas en las tecnologías mencionadas, siguiendo lo establecido en la prueba de funcionamiento en cocina (KPT) versión 3.0 y en la prueba de emisiones intramuros (PEI) durante todas las estaciones del año. Las variables evaluadas incluyen el consumo de combustible y las concentraciones de emisiones intramuros de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub>. Asimismo se estimó el impacto económico asociado al uso de esta tecnología

mejorada y se desarrolló un manual de usuario para facilitar su correcta operación y prolongar su vida útil.

Los resultados obtenidos mediante la metodología KPT mostraron un ahorro del 11.55 % en el consumo de combustible al utilizar la estufa Vilma, en comparación con el fogón tradicional. Por otro lado, al procesar la información recopilada utilizando las ecuaciones y la tabla de equivalencias para adultos estándar (SAE, por sus siglas en inglés) descritas por Bailis et al., se obtuvo un ahorro per cápita del 14.6 % en el consumo de leña seca y del 14.3 % en el de leña húmeda. Asimismo, se propuso un análisis considerando la masa de alimentos cocinados y la masa de combustible consumido, en el cual se determinó un ahorro del 35.65 % en el consumo total por cada kilogramo de comida cocinada, equivalente a una reducción del consumo per cápita anual de 147.2 kg y a una mitigación de 296.33 kg de CO<sub>2</sub>e.

Los resultados de la PEI se evaluaron con base en los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA, por sus siglas en inglés). Durante el uso del fogón, se registraron concentraciones máximas de CO que superaron el límite de 8 h entre un 76.6 % y un 159.2 %, mientras que las emisiones máximas de PM<sub>2.0</sub> sobrepasaron el límite de anual del PM<sub>2.5</sub> entre un 88 % y un 152 %. En contraste, al emplear la estufa Vilma, las concentraciones de CO se mantuvieron por debajo del límite mencionado entre un 93 % y un 100 %; además, el nivel del PM<sub>2.0</sub> se mantuvo entre un 8 % y un 17.6 % por debajo del límite anual. En cuanto al CO<sub>2</sub>, ambos dispositivos mantuvieron niveles seguros al no superar el límite de calidad mínima confiable para interiores.

El análisis del impacto económico estimó un ahorro equivalente a 549.5 MXN anuales al emplear la estufa Vilma en comparación con una estufa tradicional (fogón), con una relación costo-beneficio de 3.14 MXN por cada peso invertido durante la elaboración del prototipo, y un período aproximado de 4 años y 4 meses para recuperar de la inversión inicial. Finalmente, el manual de usuario elaborado proporciona información clave para el uso óptimo de la tecnología, facilitando que los usuarios obtengan el mejor rendimiento del dispositivo y prolonguen su vida útil.

## ABSTRACT

Ecological stoves are efficient technologies designed for cooking food that help mitigate the environmental impact associated with the use of traditional open fires, such as deforestation, soil degradation, biodiversity loss, climate change, and more. Additionally, these devices reduce the risk of contracting diseases caused by exposure to greenhouse gas (GHG) emissions, such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), among others [1–6].

In Mexico, multiple types of ecological stoves have been developed and implemented as a strategy to improve users' quality of life. Currently, the installed models incorporate various geometric shapes and thermal materials that enhance combustion efficiency, resulting in fuel savings compared to traditional devices. These technologies also include chimneys that expel smoke and gases released during combustion outside the cooking area, thereby reducing health risks associated with exposure to these emissions. Another important benefit is the mitigation of environmental impact resulting from the inefficient use of biomass and air pollution [1, 2, 4, 7, 8].

At the Institute for Research and Innovation in Renewable Energies (IIER), a technology called *Vilma* has been developed, designed based on the needs and preferences of users in southeastern Mexico. This model has already been implemented in various regions of Oaxaca and Chiapas. In this work, a field evaluation was conducted on a Vilma ecological stove to assess its performance under real operating conditions, in comparison with a traditional open fire. For this purpose, several tests were performed on both technologies following the guidelines of the Kitchen Performance Test (KPT) version 3.0 and the Indoor Emissions Performance Test (IEP) throughout all seasons of the year. The variables evaluated included fuel consumption and indoor emission concentrations of CO, CO<sub>2</sub>, and PM<sub>2.0</sub>. Additionally, the economic impact associated with the use of this improved technology was estimated, and a user manual was developed to ensure proper operation and extend the device's lifespan.

The results obtained through the KPT methodology showed an 11.55% reduction in fuel consumption when using the Vilma stove compared to the traditional open fire.

Furthermore, after processing the collected data using the equations and the Standard Adult Equivalents (SAE) table described by Bailis et al., a per capita savings of 14.6% in dry wood consumption and 14.3% in wet wood consumption was observed. An additional analysis was proposed considering the mass of food cooked and the mass of fuel consumed, which revealed a 35.65% total savings in consumption per kilogram of food cooked. This is equivalent to a reduction in annual per capita consumption of 147.2 kg and a mitigation of 296.33 kg of CO<sub>2</sub>e.

The IEP results were evaluated based on the recommended limits established by the World Health Organization (WHO) and the Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA). During the use of the traditional open fire, maximum CO concentrations exceeded the 8-hour limit by 76.6% to 159.2%, while maximum PM<sub>2.0</sub> emissions surpassed the annual PM<sub>2.5</sub> limit by 88% to 152%. In contrast, when using the Vilma stove, CO concentrations remained below the mentioned limit by 93% to 100%, and PM<sub>2.0</sub> levels remained 8% to 17.6% below the annual limit. Regarding CO<sub>2</sub>, both devices maintained safe levels without exceeding the minimum reliable indoor limit.

The economic impact analysis estimated an annual savings of 549.5 MXN when using the Vilma stove compared to a traditional stove (open fire), with a cost-benefit ratio of 3.14 MXN for every peso invested in the prototype, and an estimated payback period of approximately 4 years and 4 months. Finally, the developed user manual provides key information for optimal use of the technology, helping users achieve the best performance from the device and extend its useful life.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
<hr/>		
<b>1.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<hr/>		
<b>1.2</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>4</b>
<hr/>		
<b>1.2.1</b>	Desarrollo histórico del aprovechamiento energético de la biomasa	<b>4</b>
<hr/>		
<b>1.2.2</b>	Las tecnologías de cocción de alimentos con leña a través del tiempo	<b>5</b>
<hr/>		
<b>1.2.3</b>	Desarrollo histórico de los protocolos internacionales para la evaluación de las tecnologías de cocción con leña	<b>8</b>
<hr/>		
<b>1.2.4</b>	Estado del arte a nivel global sobre las evaluaciones en campo de las tecnologías de cocción con leña mediante estándares internacionales	<b>9</b>
<hr/>		
<b>1.2.5</b>	Estudios en campo sobre las estufas ecológicas implementadas en México	<b>16</b>
<hr/>		
<b>1.2.6</b>	Investigaciones en campo sobre las estufas ecológicas instaladas en el estado de Chiapas	<b>22</b>
<hr/>		
<b>1.3</b>	<b>Planteamiento del problema</b>	<b>25</b>
<hr/>		
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b>	<b>26</b>
<hr/>		
<b>1.4.1</b>	General	<b>26</b>
<hr/>		
<b>1.4.2</b>	Específicos	<b>26</b>
<hr/>		
<b>1.5</b>	<b>Justificación</b>	<b>28</b>
<hr/>		
<b>1.6</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>28</b>

---

---

---

---

<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>29</b>
-------------------	-----------------------------	-----------

---

<b>2.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>29</b>
------------	---------------------	-----------

---

<b>2.2</b>	<b>Biomasa</b>	<b>29</b>
------------	----------------	-----------

---

<b>2.2.1</b>	Propiedades fundamentales de la biomasa	<b>30</b>
--------------	---	-----------

---

<b>2.2.1.1</b>	Composición química	<b>30</b>
----------------	---------------------	-----------

---

<b>2.2.1.2</b>	Poder calorífico	<b>31</b>
----------------	------------------	-----------

---

<b>2.2.1.3</b>	Densidad energética	<b>31</b>
----------------	---------------------	-----------

---

<b>2.2.1.4</b>	Contenido de humedad	<b>31</b>
----------------	----------------------	-----------

---

<b>2.2.1.4.1</b>	Base seca	<b>32</b>
------------------	-----------	-----------

---

<b>2.2.1.4.2</b>	Base húmeda	<b>32</b>
------------------	-------------	-----------

---

<b>2.2.1.5</b>	Densidad aparente	<b>33</b>
----------------	-------------------	-----------

---

<b>2.2.1.6</b>	Contenido de cenizas	<b>33</b>
----------------	----------------------	-----------

---

<b>2.3</b>	<b>Bioenergía</b>	<b>34</b>
------------	-------------------	-----------

---

<b>2.3.1</b>	Procesos de conversión de la biomasa	<b>34</b>
--------------	--------------------------------------	-----------

---

<b>2.3.1.1</b>	Procesos termoquímicos	<b>35</b>
----------------	------------------------	-----------

---

<b>2.3.1.1.1</b>	<b>Combustión</b>	<b>36</b>
<b>2.3.1.1.1.1</b>	<b>Combustible</b>	<b>37</b>
<b>2.3.1.1.1.2</b>	<b>Comburente</b>	<b>37</b>
<b>2.3.1.1.1.3</b>	<b>Energía de activación (calor)</b>	<b>37</b>
<b>2.3.1.1.2</b>	<b>Fases de la combustión</b>	<b>37</b>
<b>2.3.1.1.3</b>	<b>Tipos de combustión</b>	<b>38</b>
<b>2.3.1.1.3.1</b>	<b>Combustión completa</b>	<b>38</b>
<b>2.3.1.1.3.2</b>	<b>Combustión incompleta</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1.1.3.3</b>	<b>Combustión estequiométrica (perfecta)</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1.1.4</b>	<b>Productos generados durante la combustión de leña</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1.1.4.1</b>	<b>Productos de la combustión completa</b>	<b>40</b>
<b>2.3.1.1.4.2</b>	<b>Productos de la combustión incompleta</b>	<b>40</b>
<b>2.3.1.1.5</b>	<b>Efectos de la contaminación del aire en interiores</b>	<b>41</b>
<b>2.3.1.1.6</b>	<b>Combustión en etapas múltiples</b>	<b>42</b>
<b>2.3.1.1.6.1</b>	<b>Combustión primaria</b>	<b>42</b>

<b>2.3.1.1.6.2</b>	Combustión secundaria o doble combustión (sistemas mejorados)	<b>43</b>
<b>2.3.1.1.6.3</b>	Combustión terciaria o triple combustión (sistemas avanzados)	<b>44</b>
<b>2.4</b>	<b>Tecnologías de estufas mejoradas para la cocción de alimentos con leña</b>	<b>45</b>
<b>2.4.1</b>	Modelos principales implementados en México	<b>46</b>
<b>2.4.1.1</b>	Lorena	<b>46</b>
<b>2.4.1.2</b>	Patsari	<b>47</b>
<b>2.4.1.3</b>	Túumben K'óoben	<b>47</b>
<b>2.4.1.4</b>	Onil	<b>48</b>
<b>2.4.1.5</b>	Rocket	<b>49</b>
<b>2.4.2</b>	Modelos principales implementados en Chiapas	<b>49</b>
<b>2.4.2.1</b>	CETA	<b>49</b>
<b>2.4.2.2</b>	Lekil Vaj	<b>50</b>
<b>2.4.2.3</b>	Enerchía	<b>51</b>
<b>2.4.3</b>	Estufa ecológica Vilma	<b>51</b>
<b>2.5</b>	<b>Protocolos para la evaluación de estufas ecológicas</b>	<b>52</b>

<b>2.5.1</b>	Evaluación en laboratorio	<b>53</b>
<b>2.5.2</b>	Evaluación en campo	<b>53</b>
<b>2.5.2.1</b>	Prueba de funcionamiento en cocina (KPT)	<b>53</b>
<b>2.5.2.2</b>	Prueba de emisiones intramuros (PEI)	<b>54</b>
<b>2.6</b>	<b>Evaluación financiera de proyectos de inversión</b>	<b>55</b>
<b>2.6.1</b>	Inversión	<b>55</b>
<b>2.6.2</b>	Flujo de efectivo	<b>55</b>
<b>2.6.3</b>	Tasa de descuento o de rendimiento mínimo aceptable	<b>56</b>
<b>2.6.4</b>	Valor presente neto	<b>56</b>
<b>2.6.5</b>	Tasa interna de retorno	<b>57</b>
<b>2.6.6</b>	Relación costo-beneficio	<b>58</b>
<b>2.6.7</b>	Período de recuperación de la inversión	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>60</b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Prueba de funcionamiento en cocina (KPT versión 3.0)</b>	<b>61</b>

3.2.1	Evaluación cualitativa	61
3.2.2	Evaluación cuantitativa	62
3.3	<b>Prueba de emisiones intramuros (PEI versión 1.0)</b>	<b>64</b>
3.4	<b>Cálculo del impacto económico</b>	<b>65</b>
3.5	<b>Desarrollo del manual de usuario</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>70</b>
4.1	<b>Introducción</b>	<b>70</b>
4.2	<b>Resultados cualitativos</b>	<b>70</b>
4.2.1	Descripción de la zona geográfica de estudio	70
4.2.2	Características de la vivienda	72
4.2.3	Adquisición y uso de combustibles	74
4.2.4	Características de las especies dendroenergéticas utilizadas	75
4.2.5	Prácticas de cocción con leña	76
4.2.6	Descripción de las tecnologías de cocción	77
4.3	<b>Resultados cuantitativos</b>	<b>84</b>

<b>4.3.1</b>	Variación de la humedad del combustible en cada estación del año	<b>85</b>
<b>4.3.2</b>	Consumo de combustible y masa de alimentos cocinados en cada estación del año	<b>86</b>
<b>4.3.3</b>	Emisiones intramuros	<b>91</b>
<b>4.3.3.1</b>	Monóxido de carbono intramuros	<b>92</b>
<b>4.3.3.2</b>	Dióxido de carbono intramuros	<b>95</b>
<b>4.3.3.3</b>	Material particulado fino intramuros de 2.0 micras	<b>98</b>
<b>4.3.4</b>	Impacto económico	<b>101</b>
<b>4.4</b>	<b>Manual de usuario</b>	<b>105</b>
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>107</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>110</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>126</b>
<b>Anexo A</b>	<b>Prueba de funcionamiento en cocina (KPT versión 3.0)</b>	<b>126</b>
<b>Anexo B</b>	<b>Prueba de emisiones de gases intramuros (PEI versión 1.0)</b>	<b>140</b>
<b>Anexo C</b>	<b>Características de los equipos e instrumentos de evaluación</b>	<b>145</b>
<b>Anexo D</b>	<b>Manual de usuario de la estufa ecológica Vilma</b>	<b>148</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Clasificación de la biomasa de acuerdo con su origen	<b>30</b>
<b>Figura 2.2</b>	Métodos termoquímicos de transformación energética de la biomasa	<b>35</b>
<b>Figura 2.3</b>	Triangulo de fuego	<b>36</b>
<b>Figura 2.4</b>	Sistema de combustión primaria	<b>43</b>
<b>Figura 2.5</b>	Sistema de combustión secundaria o doble combustión	<b>44</b>
<b>Figura 2.6</b>	Sistema de combustión terciaria o triple combustión	<b>45</b>
<b>Figura 2.7</b>	Estufa ecológica Lorena	<b>46</b>
<b>Figura 2.8</b>	Estufa ecológica Patsari	<b>47</b>
<b>Figura 2.9</b>	Estufa ecológica Túumben K'óoben	<b>48</b>
<b>Figura 2.10</b>	Estufa ecológica Onil	<b>48</b>
<b>Figura 2.11</b>	Estufas ecológicas Rocket	<b>49</b>
<b>Figura 2.12</b>	Estufa ecológica CETA	<b>50</b>
<b>Figura 2.13</b>	Estufa ecológica Lekil Vaj	<b>50</b>
<b>Figura 2.14</b>	Estufa ecológica Enerchía	<b>51</b>
<b>Figura 2.15</b>	Modelo 3D de la estufa ecológica Vilma	<b>52</b>

<b>Figura 3.1</b>	Metodología de evaluación implementada	<b>60</b>
<b>Figura 4.1</b>	Región de estudio en el estado de Oaxaca	<b>71</b>
<b>Figura 4.2</b>	Cocina del interior de la vivienda	<b>72</b>
<b>Figura 4.3</b>	Cocina en el exterior de la vivienda	<b>73</b>
<b>Figura 4.4</b>	Tecnologías de cocción que utilizan leña	<b>73</b>
<b>Figura 4.5</b>	Porcentaje de uso de cada combustible previo a la implementación de la estufa Vilma durante un lapso de una semana	<b>74</b>
<b>Figura 4.6</b>	Porcentaje de uso de cada combustible posterior a la implementación de la estufa Vilma	<b>75</b>
<b>Figura 4.7</b>	Estufa comercial de gas LP	<b>78</b>
<b>Figura 4.8</b>	Fogón de láminas de acero	<b>80</b>
<b>Figura 4.9</b>	Fogón tradicional en forma de herradura en la vivienda evaluada	<b>81</b>
<b>Figura 4.10</b>	Horno tradicional de barro en el lugar de evaluación	<b>82</b>
<b>Figura 4.11</b>	Estufa ecológica de doble combustión Vilma	<b>83</b>
<b>Figura 4.12</b>	Mediciones del contenido de humedad de la leña (base seca)	<b>85</b>
<b>Figura 4.13</b>	Variación de la humedad del combustible a lo largo del período evaluado	<b>86</b>
<b>Figura 4.14</b>	Cocción de alimentos: A) estufa ecológica Vilma y B) fogón tradicional	<b>87</b>

<b>Figura 4.15</b>	Medición del: C) consumo de combustible y D) masa de alimentos cocinados	<b>87</b>
<b>Figura 4.16</b>	Consumo de combustible en el fogón tradicional y en la estufa ecológica Vilma durante cada época del año	<b>88</b>
<b>Figura 4.17</b>	Masa de alimentos cocinados en el fogón tradicional y en la estufa ecológica Vilma durante cada época del año	<b>90</b>
<b>Figura 4.18</b>	Evaluaciones de las emisiones intramuros del fogón	<b>92</b>
<b>Figura 4.19</b>	Evaluaciones de las emisiones intramuros en la estufa ecológica Vilma	<b>92</b>
<b>Figura 4.20</b>	Emisiones intramuros promedio de monóxido de carbono (CO) generadas al emplear el fogón tradicional en cada temporada del año	<b>93</b>
<b>Figura 4.21</b>	Emisiones intramuros promedio de monóxido de carbono (CO) al utilizar la estufa ecológica Vilma en cada época del año	<b>95</b>
<b>Figura 4.22</b>	Emisiones intramuros promedio de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) generadas al emplear el fogón tradicional en cada temporada del año	<b>96</b>
<b>Figura 4.23</b>	Emisiones intramuros promedio de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) al utilizar la estufa ecológica Vilma en cada época del año	<b>98</b>
<b>Figura 4.24</b>	Emisiones intramuros promedio de material particulado fino (PM <sub>2.0</sub> ) al emplear el fogón tradicional durante cada temporada del año	<b>99</b>
<b>Figura 4.25</b>	Emisiones intramuros promedio de material particulado fino (PM <sub>2.0</sub> ) al emplear la estufa Vilma durante cada época del año	<b>101</b>
<b>Figura 4.26</b>	Flujo acumulado de efectivo durante un período de 15 años	<b>105</b>
<b>Figura 4.27</b>	Portada del manual de usuario de la estufa ecológica Vilma	<b>106</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Inversión fija	<b>66</b>
<b>Tabla 3.2</b>	Costo y masa combustible adquirida en cada temporada	<b>66</b>
<b>Tabla 3.3</b>	Costo del consumo de combustible estimado por kg de alimento cocinado en cada temporada	<b>67</b>
<b>Tabla 3.4</b>	Flujos netos de efectivo	<b>68</b>
<b>Tabla 4.1</b>	Características recomendadas para el aprovechamiento óptimo como combustible de las especies forestales utilizadas en la zona de evaluación	<b>76</b>
<b>Tabla 4.2</b>	Integrantes de la vivienda evaluada de acuerdo con la clasificación de los factores de equivalencia de adulto estándar (SAE)	<b>87</b>
<b>Tabla 4.3</b>	Precio de los últimos 5 años del de combustible	<b>102</b>
<b>Tabla 4.4</b>	Costo y masa combustible adquirida en cada temporada evaluada	<b>103</b>
<b>Tabla 4.5</b>	Costo del consumo de combustible estimado por kg de alimento cocinado en cada temporada	<b>103</b>

## NOMENCLATURA DE TÉRMINOS

Símbolo o Término	Descripción
$AhorroP_{diario}$	Ahorro económico promedio diario
$^{\circ}C$	Temperatura en grados Celsius
$C/B$	Relación costo – beneficio
$CCT$	Prueba de cocción controlada
$CH_4$	Metano
$cm$	Centímetro
$C_{comb}$	Consumo de combustible
$CostoP_{comb/kgA}$	Costo promedio equivalente del consumo diario de combustible por kilogramo de comida cocinada
$CostoP_{comb/S}$	Costo promedio equivalente del consumo semanal de leña
$CostoP_{kg}$	Costo promedio del kilogramo de leña adquirida
$Costo_{fogón}$	Costo equivalente del consumo de leña por kilogramo de comida cocinada en el fogón
$Costo_{vilma}$	Costo equivalente del consumo de leña por kilogramo de comida cocinada en la estufa ecológica Vilma
$CO$	Monóxido de carbono
$CO_2$	Dióxido de carbono

<b><math>CO_2e</math></b>	Dióxido de carbono equivalente
<b><math>COV</math></b>	Compuestos orgánicos volátiles
<b><math>ENCEVI</math></b>	Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares
<b><math>EPOC</math></b>	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
<b><math>FE</math></b>	Flujo de efectivo
<b><math>FE_{AC}</math></b>	Flujo de efectivo acumulado
<b><math>g</math></b>	Gramo
<b><math>\mu g/m^3</math></b>	Microgramo sobre metro cúbico
<b><math>h</math></b>	Contenido de humedad en base seca
<b><math>H</math></b>	Contenido de humedad en base húmeda
<b><math>HAP</math></b>	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
<b><math>HC</math></b>	Hidrocarburos no quemados
<b><math>GEI</math></b>	Gases de efecto invernadero
<b><math>H_2O</math></b>	Agua
<b><math>i</math></b>	Tasa de descuento o de rendimiento mínimo aceptable
<b><math>I</math></b>	Inversión

<b><math>IPA_{comb}</math></b>	Incremento promedio anual en el precio de la leña
<b><math>J</math></b>	Julio o Joule
<b><math>MJ</math></b>	Megajulio o Megajoule
<b><math>kg</math></b>	Kilogramo
<b><math>KPT</math></b>	Kitchen Performance Test (Prueba de funcionamiento en cocina)
<b><math>m</math></b>	Metro
<b><math>MXN</math></b>	Pesos mexicanos
<b><math>n</math></b>	Coefficiente de exceso de aire
<b><math>NMVOC</math></b>	Componentes orgánicos volátiles distintos del metano
<b><math>NO_x</math></b>	Óxidos de nitrógeno
<b><math>N_2O</math></b>	Óxido nitroso
<b><math>P_h</math></b>	Masa total del combustible (incluyendo la humedad)
<b><math>P_s</math></b>	Masa total del combustible (sin considerar la humedad)
<b><math>PEI</math></b>	Prueba de emisiones intramuros
<b><math>PCI</math></b>	Poder calorífico inferior
<b><math>PCS</math></b>	Poder calorífico superior

---

<b><i>PCTC</i></b>	Protocolo de comportamiento térmico del comal
<b><i>PM</i></b>	Material particulado
<b><i>PM<sub>2.0</sub></i></b>	Material particulado fino de 2.0 micrómetros de diámetro
<b><i>PM<sub>2.5</sub></i></b>	Material particulado fino de 2.5 micrómetros de diámetro
<b><i>PM<sub>10</sub></i></b>	Material particulado grueso de 10 micrómetros de diámetro
<b><i>ppm</i></b>	Partes por millón
<b><i>PRI</i></b>	Período de recuperación de la inversión
<b><i>PRI<sub>Vilma</sub></i></b>	Período de recuperación de la inversión asociado al uso de la estufa Vilma
<b><i>SAE</i></b>	Standard Adult Equivalence (Equivalencia estándar de adultos)
<b><i>t</i></b>	Tonelada métrica
<b><i>TIR</i></b>	Tasa interna de retorno
<b><i>TIR<sub>Vilma</sub></i></b>	Tasa interna de retorno asociado al uso de la estufa Vilma
<b><i>UFP</i></b>	Material particulado ultrafino
<b><i>VPN</i></b>	Valor presente neto
<b><i>VPN<sub>Vilma</sub></i></b>	Valor presente neto asociado al uso de la estufa Vilma
<b><i>WBT</i></b>	Prueba de ebullición de agua

---

## CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

En esta sección se agrupan los elementos que brindan soporte y delimitan el contenido de este trabajo de investigación. Este capítulo se divide en los apartados de introducción, antecedentes, planteamiento del problema, objetivos, justificación e hipótesis, en los cuales se proporciona una visión general que abarca el desarrollo de las tecnologías tradicionales de cocción de alimentos hasta los modelos eficientes actuales. Asimismo, se abordan diversos trabajos de investigación con el fin de conocer el estado del arte en torno a la evaluación en campo de estufas ecológicas, definir los alcances del proyecto, respaldar la importancia de su realización y establecer el resultado teórico.

### 1.1. Introducción

Durante décadas, el uso de combustibles fósiles ha generado diversas problemáticas a nivel mundial, entre éstas se incluyen el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, reducción de la calidad del aire, entre otras [9]. Otro gran inconveniente son los limitados recursos energéticos, de acuerdo con la información reportada por la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) se estima que entre 4 y 5 décadas se habrán agotado todas las reservas, si se mantiene la demanda actual y no se descubren nuevos yacimientos [10].

Una alternativa a los hidrocarburos fósiles son las fuentes de energía renovable, entre las cuales destaca la energía proveniente de la biomasa, también denominada bioenergía. Este recurso puede ser aprovechado mediante diversos procesos, los cuales se clasifican en fisicoquímicos, bioquímicos y termoquímicos [11,12]. Uno de los métodos más comúnmente empleados para la transformación termoquímica de la biomasa es la combustión, esta reacción se produce cuando un combustible se calienta hasta reaccionar con el oxígeno en el aire, emitiendo luz, calor y nuevas sustancias como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua, cenizas y otros residuos sólidos [13]; la energía producida por esta vía es aprovechada en diferentes sectores de la sociedad, entre los que se encuentran el hogar, el transporte, la industria, entre otros [14].

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) la bioenergía cubrió alrededor del 6.5 % de la demanda energética primaria a nivel mundial

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

en 2023, dentro de esta categoría, la producción a partir de biomasa sólida, que incluye el uso de leña sistemas eficientes y sostenibles, constituyó alrededor del 3.5 % del consumo final de energía global [15], sin embargo, estas cifras no consideran el uso de este recurso en cocinas tradicionales, que sigue siendo una fuente significativa de energía en muchas regiones en desarrollo. Actualmente, las tecnologías tradicionales empleadas para su aprovechamiento presentan bajos rendimientos, ocasionando la generación de gases contaminantes y altos consumos de combustible, estas problemáticas afectan principalmente a la salud humana y al medio ambiente [16, 17].

Entre las tecnologías tradicionales se encuentran los fogones abiertos, de acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), estos fueron utilizados por aproximadamente 2,600 millones de personas en 2022, empleando diversos combustibles sólidos, tales como leña, estiércol, carbón vegetal y mineral, entre otros. La combustión, comúnmente incompleta en estos dispositivos, genera altos niveles de contaminantes que afectan la salud de los usuarios, provocando enfermedades como accidentes cerebrovasculares, cardiopatía isquémica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, entre otras. Desde una perspectiva ambiental, el uso de estas tecnologías a nivel global contribuye a diversos problemas medioambientales, tales como la deforestación, la disminución de la calidad del aire, la pérdida de biodiversidad, el incremento de gases de efecto invernadero, entre otros. De acuerdo con datos de la OMS, esta problemática ocasionó cerca 3.2 millones de muertes en el 2020 [16-18], ante este panorama, se ha enfatizado la necesidad de reducir las emisiones contaminantes generadas durante el uso de dispositivos basados en biomasa, con el fin de cumplir con los límites establecidos en las normas de calidad del aire [16]. En México, aproximadamente 28 millones de habitantes (23 % de la población) utilizan leña o carbón para cocinar, de acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI), realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2018. Dicho estudio reveló que el principal combustible empleado en el país es el gas LP (empleado por el 79 % de los habitantes), seguido por la leña y el carbón con un 11 %, y el gas natural con el 7 % [19, 20].

En México la leña es el principal recurso energético renovable, según el último balance energético nacional publicado por la Secretaría de Energía (SENER); en 2022 los

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

recursos renovables suministraron apenas el 15.4 % de la producción energética nacional, entre ellas la biomasa sólida (principalmente bagazo de caña y la leña) aportó el 1.88 % del total [21]. De acuerdo con el censo de población y vivienda 2020 realizado por el INEGI, los estados del sur del país concentran las mayores poblaciones que utilizan leña o carbón como fuente energética principal para la cocción de alimentos, siendo Oaxaca y Chiapas las regiones con los porcentajes más altos (aproximadamente el 50 %) de habitantes que emplean estos recursos [20]. Cabe mencionar que este recurso representa la fuente de energía más asequible para la población en situación de pobreza y pobreza extrema, el cual es aprovechado habitualmente a través de fogones abiertos y, en menor medida, a través de estufas ecológicas [22].

Las estufas ecológicas son una tecnología que permite mitigar la contaminación provocada por los gases intramuros emitidos durante la combustión de la leña. Estos dispositivos están diseñados para redireccionar y expulsar los contaminantes de las zonas de cocinado, lo que, a su vez, disminuye en gran medida los riesgos para la salud de los usuarios y el consumo de combustible en comparación con dispositivos tradicionales. Otros beneficios son la capacidad de almacenar el calor por largos periodos y el bajo riesgo de operación, esto se atribuye a los diseños compactos y aislantes térmicos utilizados [5].

Hasta el día de hoy, múltiples instituciones han desarrollado diversos modelos de estufas ecológicas en México, entre los que destacan la Patsari, Mera-Mera, Túumben K'óoben y Ecostufa [23]. Entre estas se encuentra el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (IIER-UNICACH), donde recientemente se desarrolló y evaluó en laboratorio una estufa ecológica que incorpora conductos para aire secundario, lo que permite al dispositivo alcanzar una doble combustión, los resultados de dicha investigación se han reportado en el trabajo denominado "Evaluación de una estufa ecológica de doble combustión implementando protocolos internacionales y locales" de Arreola Gómez C. [24].

Cabe destacar que los resultados obtenidos por Arreola Gómez C. revelaron que la incorporación de la combustión secundaria reduce las emisiones intramuros del monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y material particulado fino de 2.0 micras (PM<sub>2.0</sub>), el tiempo de arranque, el consumo de combustible y tiempos de cocción de alimentos. Asimismo, se incrementó la eficiencia térmica del dispositivo y la temperatura máxima

# CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

alcanzada en el comal respecto a modelos anteriores [25]. Hoy en día esta tecnología se ha implementado en algunas comunidades de la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, sin embargo, se desconoce su funcionamiento en campo. En tal sentido, en este trabajo se llevó a cabo la evaluación de una estufa ecológica de doble combustión en condiciones reales de operación, en la comunidad de San Francisco del mar Oaxaca.

## 1.2. Antecedentes

La biomasa es la fuente energética más antigua utilizada por la humanidad, el aprovechamiento de este recurso data de hace aproximadamente 1.8 millones de años [26]. Asimismo, esta fue la principal fuente de energía en todo el mundo hasta la Revolución Industrial y el descubrimiento de los combustibles fósiles; en la actualidad, este recurso renovable es considerado una de las alternativas energéticas frente al agotamiento del petróleo [27].

### 1.2.1. Desarrollo histórico del aprovechamiento energético de la biomasa

A lo largo de la historia, la energía contenida en la biomasa ha sido aprovechada para diversas actividades, tales como la calefacción, la cocción de alimentos, el secado de productos agrícolas, entre otras. De manera sustentable, este recurso puede utilizarse en la producción de combustibles derivados de materia orgánica, denominados biocombustibles; entre ellos, el primero en ser empleado por la humanidad fue la leña [28].

Alrededor del año 1770 se descubrió el metano, hallazgo que se atribuye al científico italiano Alessandro Volta, quien basó su investigación en los trabajos sobre el “aire inflamable” publicados por el estadounidense Benjamín Franklin. Dichos estudios describían la obtención de un gas combustible a partir de la descomposición de materia orgánica bajo ciertas condiciones [29, 30]. Estos avances sentaron las bases para la construcción de los primeros biodigestores en la India, en el año 1859 [31, 32].

Décadas más tarde, en 1824, comenzaron a utilizarse combustibles líquidos de origen fósil como fuente energética [33]. Posteriormente, en 1826, se empleó por primera vez el bioetanol como combustible en un motor [34-36]. Más adelante, en 1908, Henry Ford

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

desarrolló el diseño del automóvil (Ford T), el cual funcionaba con una mezcla de bioetanol y gasolina [33, 34].

A principios del siglo XX, se comenzaron a utilizar mezclas con diferentes proporciones de bioetanol en la gasolina con el propósito de aumentar el octanaje [34, 35, 37]. Por otro lado, la primera experiencia documentada del uso de un biocombustible en el transporte público se remonta a 1938 cuando se empleó biodiésel en la línea de ómnibus Bruselas-Lovaina en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial [33].

A raíz de estos antecedentes, y especialmente tras la primera crisis petrolera de 1973, surgieron los primeros mercados modernos de biocombustibles en el mundo [36]. En la actualidad, a nivel internacional, la investigación sobre los biocombustibles se ha enfocado principalmente en aplicaciones del sector transporte, así como en la generación de energía eléctrica y térmica.

En México, los biocombustibles representan una gran oportunidad para el desarrollo sostenible. En este sentido, el gobierno ha promovido principalmente la producción de líquidos, como el bioetanol y el biodiésel. No obstante, los esfuerzos para aprovechar los recursos disponibles han sido limitados. De acuerdo con el Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales (NRDC, por sus siglas en inglés), estos últimos podrían emplearse para atender la creciente demanda energética de la población, al tiempo que permitirían sustituir progresivamente el uso de hidrocarburos fósiles como fuente primaria, contribuyendo así a mitigar los impactos negativos ocasionados por su utilización [38].

### **1.2.2. Las tecnologías de cocción de alimentos con leña a través del tiempo**

El desarrollo de las cocinas a base de leña tiene su origen miles de años atrás. Este invento se le atribuye al *Homo erectus*, especie que habitó la Tierra hace aproximadamente un millón de años. Se estima que alrededor del año 500 000 a.C., esta especie descubrió y dominó una técnica para producir fuego, ya que, antes de este suceso, las llamas solo se obtenían a partir de incendios u otros fenómenos naturales [39-41].

Después de que los ancestros del ser humano desarrollaran una técnica para producir fuego, comenzaron a crear dispositivos primitivos que utilizaban leña para la

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

cocción de alimentos. Estos consistían en formaciones de piedras que rodeaban al fuego. Se estima que los ejemplares más antiguos se construyeron hace aproximadamente 500 000 años en Europa y 400 000 años en China [42]. En la actualidad, esta tecnología es ampliamente conocida como fogón tradicional y, hasta nuestros días, continúa utilizándose en distintas regiones del mundo. No obstante, su diseño ha evolucionado con el tiempo, incorporando materiales como barro, ladrillos de arcilla, bloques de cemento, entre otros.

Posteriormente, hacia el año 7000 a.C., la cocina primitiva experimentó una de sus primeras grandes innovaciones con la invención de las vasijas de barro, lo cual representó un avance significativo en el desarrollo de la gastronomía. Más tarde, hacia el año 5000 a.C., surgieron en Egipto y Babilonia los primeros hornos de adobe, los cuales permitían asar los alimentos de forma más uniforme [43, 44].

La primera patente para una estufa de leña fue otorgada en el año 1557 en la ciudad de Estrasburgo, ubicada en Francia. La estructura de este dispositivo estaba compuesta principalmente por acero o hierro fundido, materiales que envolvían una cámara de combustión con una base hecha de cerámica. Años más tarde, aproximadamente en 1740, Benjamín Franklin desarrolló el primer prototipo de la estufa Franklin, el cual incorporó un deflector en la parte posterior, lo que le permitió alcanzar mayores temperaturas. Hacia finales del siglo XVIII, este dispositivo fue modificado con la inclusión de compuertas de tiro ajustable, lo que permitió a los usuarios regular la cantidad de aire que ingresaba a la cámara de combustión [45].

Años después, con el surgimiento de la crisis del petróleo a finales del siglo XIX, las estufas de leña se convirtieron en la principal fuente de calefacción. Sin embargo, el uso desproporcionado de este recurso, sumado a la contaminación generada por los hidrocarburos fósiles, ocasionó diversas repercusiones medioambientales, tales como la contaminación del aire y la deforestación de zonas verdes. Estos sucesos impulsaron a la comunidad científica a desarrollar nuevas tecnologías de cocción y calefacción más eficientes con el objetivo de mitigar dichas problemáticas [33].

El desarrollo de las tecnologías mejoradas para la cocción de alimentos comenzó a mediados del siglo XX en la India e Indonesia, así como durante la década de los setenta, en África y Centroamérica. Los primeros dispositivos consistían en estructuras de barro que

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

encerraban al fuego dentro de una cámara de combustión, los cuales incorporaban chimeneas, compuertas metálicas reguladoras de aire y múltiples espacios para recipientes. No obstante, entre sus principales limitaciones se encontraban los altos costos y la complejidad de fabricación en comparación con la tecnología tradicional [42, 46].

La segunda generación de estufas mejoradas surgió durante la década de 1970. Estos modelos presentaban diseños más elaborados, fundamentados en investigaciones en el campo de la termodinámica, transferencia de calor y aerodinámica, con el objetivo principal de optimizar el consumo de combustible. Sin embargo, estas tecnologías no consideraban aspectos socioeconómicos ni culturales, lo que dificultó su accesibilidad y aceptación social. Entre los dispositivos representativos de esta etapa se encuentra la estufa Lorena, la cual incorporaba una chimenea y un comal metálico con discos desmontables, dispuestos sobre una cámara de combustión construida con adobe, ladrillos o bloques de cemento [41, 46].

A finales de la década de 1980 aparecieron los primeros modelos de la tercera generación de estufas mejoradas, cuyos diseños consideraban las necesidades de los usuarios y aspectos como la comodidad durante la cocción, la seguridad durante el uso y el ahorro de combustible. Entre estas tecnologías destacan las estufas tipo Rocket, compuestas típicamente por una hornilla con espacio para un único recipiente, fabricada con materiales como barro, arcilla y acero. Algunas décadas más tarde, surgieron otras variantes las cuales integraban comales de hierro fundido con diferentes dimensiones y formas, lo cual permitió realizar múltiples tareas de cocción de manera simultánea. En años recientes, se ha sustituido el barro como componente estructural por láminas de acero, ladrillos de arcilla y tablas de madera, lo que ha contribuido a reducir la masa de los dispositivos, facilitando su transporte y extendiendo su vida útil. Entre los modelos representativos en Centroamérica se encuentran la Onil, desarrollada en Guatemala, y la estufa Justa, originaria de Honduras. En el caso de México, uno de los modelos más reconocidos es la Patsari diseñada en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Específicamente, en el estado de Chiapas se han creado múltiples dispositivos de cocción de alimentos en el IIIER-UNICACH, tales como la Enerchía, Lekil Vaj, Llamalinda y Vilma, cabe señalar que el desempeño de estos prototipos no ha sido evaluado en condiciones reales de operación, utilizando protocolos estandarizados [41, 46].

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

### 1.2.3. Desarrollo histórico de los protocolos internacionales para la evaluación de las tecnologías de cocción con leña

A lo largo de la historia, diversas organizaciones e investigadores han realizado esfuerzos por establecer metodologías adecuadas para la evaluación en campo de las tecnologías de cocción a base de leña.

Uno de los primeros antecedentes se remonta a 1982, cuando los Voluntarios en Asistencia Técnica (VITA, por sus siglas en inglés) publicaron un documento titulado “Testing the Efficiency of Wood Burning Cookstoves”. En este trabajo se describieron las primeras metodologías para la evaluación en laboratorio de tecnologías de cocción que utilizan leña, entre las que se incluyen la prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test, WBT) y el protocolo de cocción controlada (Controlled Cooking Test, CCT)<sup>1</sup>. Paralelamente, se introdujo la prueba de funcionamiento en cocina (Kitchen Performance Test, KPT), considerada como el primer procedimiento enfocado en evaluaciones de campo. Esta última tenía como objetivos estudiar el impacto de las nuevas tecnologías de cocción en los hogares y demostrar el potencial de ahorro en el consumo de combustible al aplicar las prácticas de cocción adecuadas [47].

En octubre del 2004 se publicó la segunda versión del protocolo KPT, elaborada por el Dr. Rob Bailis, de la Universidad de California, Berkeley, en colaboración con Kirk R. Smith y Rufus Edwards. Este trabajo fue desarrollado como parte del programa de Salud y Energía doméstica de la Fundación Shell. Entre los cambios más relevantes se incluyó la incorporación de encuestas cualitativas sobre el rendimiento y la aceptabilidad de las estufas, así como un cuestionario orientado a evaluar el consumo de combustible, con la finalidad de comparar el desempeño entre tecnologías tradicionales y mejoradas. Posteriormente, en 2007, este trabajo fue retomado por Bailis y colaboradores, originando la creación de la versión 3.0 del protocolo. Esta nueva edición consideró el uso doméstico de diversos combustibles líquidos y gaseosos, y añadió una hoja de cálculo para facilitar el análisis de los datos obtenidos [48], [49].

---

<sup>1</sup> El desarrollo histórico de los protocolos CCT y WBT se presenta en el documento [25].

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

En marzo de 2018 se publicó la edición más reciente del protocolo KPT (versión 4.0), desarrollada en colaboración por Rob Bailis, Ryan Thompson, Nicholas Lam, Víctor Berrueta, Godfrey Muhwezi y Esther Adams. Esta nueva versión tiene como objetivo principal la evaluación cuantitativa del consumo de combustible, por lo que se excluyeron los cuestionarios cualitativos, así como la hoja de cálculo incluida en la versión anterior [50].

En los últimos años, las metodologías mencionadas han sido empleadas en combinación con otros protocolos para evaluar el funcionamiento en campo de diversas estufas de leña a nivel mundial. Estas investigaciones han tenido como objetivos analizar el consumo de combustible, los patrones de uso de las tecnologías de cocción, el impacto de las emisiones generadas, el nivel de adopción de los dispositivos, entre otros aspectos.

### **1.2.4. Estado del arte a nivel global sobre las evaluaciones en campo de las tecnologías de cocción con leña mediante estándares internacionales**

Entre las investigaciones más recientes reportadas a nivel internacional se encuentra el trabajo realizado por Mapereka Francis et al. [51], quienes en 2017 presentaron un trabajo denominado “Performance assessment of an improved cook stove (Esperanza) in a typical domestic setting: implications for Energy saving”. En él se evaluó el consumo de combustible de las estufas “Esperanza” respecto a las tradicionales “Tres piedras” en la región de Mulanje, ubicada en el sur de Malawi. Además, se analizó el impacto de mantener abierto el cenicero en la estufa mejorada. La investigación se inició con una muestra de 21 estufas Esperanza y 17 Tres piedras. Posteriormente se aplicó la prueba de funcionamiento en cocina (KPT) en ambos dispositivos. Como parte del proceso metodológico, se proporcionó un cuestionario cualitativo a los usuarios, se midió el contenido de humedad en la leña, así como el consumo de combustible en un período de cuatro días consecutivos. Los datos recabados en las evaluaciones se ingresaron en la hoja de cálculo VITA KPT para su análisis. El estudio sobre el cenicero se realizó mediante el registro de temperaturas en un termopar ubicado a 5 cm del perímetro de la estufa durante tres días consecutivos.

La información obtenida mediante KPT reveló un consumo promedio de leña de 4.2 kg (78.3 MJ) para Tres piedras y 7.8 kg (147.5 MJ, 88.4 % mayor a la energía utilizada por Tres piedras) para la estufa Esperanza. Cabe destacar que las desviaciones estándar

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

mostraron una menor variabilidad en la tecnología tradicional en comparación con la estufa ecológica. Es importante resaltar, que se observaron pérdidas de calor cuando la Esperanza mantenía abierto el cenicero, esto se corroboró al registrar bajos incrementos en la temperatura alcanzada en la superficie del dispositivo.

Los autores concluyeron que las prácticas de cocción influyen significativamente en el funcionamiento de los dispositivos (pérdida de calor y el consumo de leña), de modo que si los usuarios de la estufa Esperanza (o cualquier otra estufa mejorada) no están capacitados, nunca se podrá alcanzar el mayor rendimiento posible, además se destaca la necesidad de realizar estudios sobre el tipo de combustible ideal que sea adecuado para su uso en la estufa Esperanza.

En 2018, Beyene y Motuma [52] desarrollaron el estudio “Adoption and kitchen performance test of improved cook stove in the Bale Eco-Region of Ethiopia”, donde se analizó el nivel de apropiación, el rendimiento en condiciones reales de operación y la reducción de emisiones generadas por el uso estufas de leña mejoradas implementadas en la región de Bale en el sureste de Etiopía.

Con base en lo anterior, inicialmente se utilizó una técnica de muestreo de etapas múltiples con enfoque longitudinal. Para ello, se seleccionaron dos distritos de la región y un tamaño de muestra conformado por 342 familias, a quienes posteriormente se les realizó una encuesta sobre el uso y manejo de la tecnología. A la par de lo anterior se realizaron evaluaciones en 25 y 30 viviendas con estufas ecológicas y tradicionales, respectivamente, empleando la prueba de funcionamiento en cocina (KPT). Dicho protocolo se repitió durante ocho días seguidos en los cuales se midió la humedad, el consumo de combustible y el número de platos cocinados diariamente.

Los resultados mostraron que solo el 45 % de los hogares considerados empleaban tecnologías mejoradas, mientras que el resto utilizaba dispositivos tradicionales. La KPT indicó un consumo promedio diario de leña para la estufa tradicional y ecológica de 1.12 kg y 0.79 kg (ahorro del 29 % en comparación al modelo típico), respectivamente. Cabe resaltar que este último dato equivale a un ahorro anual per cápita de 116.8 kg, lo que, a su vez, significa una reducción anual de 0.126 t de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e).

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

Los investigadores concluyeron que el uso correcto de estufas mejoradas (ecológicas) reduce significativamente las emisiones, por lo que estos dispositivos pueden integrarse en estrategias de desarrollo limpio principalmente en países en donde la biomasa juega un papel importante como fuente de energía. Asimismo, recomendaron realizar evaluaciones durante todas las estaciones del año, debido a la influencia de las variaciones en la disponibilidad, las propiedades y el tipo de combustible utilizado, así como en las recetas y la cantidad de alimentos preparados.

En 2019, Hawi Abera [53] presentó un trabajo de investigación bajo el nombre de “The potential of improved cook stoves in fuel wood saving and carbon dioxide emission reduction: the case of Sayo woreda, Oromia, western Ethiopia”, en la que realizó la evaluación del ahorro de combustible, la reducción de emisiones contaminantes y la adopción tecnológica de la estufa ecológica Mirt en dos regiones de Etiopía. Para ello empleó una metodología basada en el protocolo de funcionamiento en cocina (KPT) para la cual se consideraron aspectos cualitativos y parámetros cuantitativos.

En un principio se emplearon las técnicas de muestreo aleatorio simple y estratificado con las que se determinó un tamaño de muestra conformado por 191 cocinas con estufas Mirt y tradicionales, a quienes posteriormente se les suministró un cuestionario cualitativo. De acuerdo con lo anterior, también se seleccionaron 30 usuarios de Mirt y 35 con el modelo convencional, quienes participaron en la evaluación mediante la prueba de funcionamiento en cocina (KPT) durante 8 días consecutivos. Cabe mencionar que durante dichas evaluaciones se midió el contenido de humedad y consumo de combustible de la leña durante 8 días seguidos.

Los resultados destacaron a la leña como el principal recurso energético empleado (85 % de los hogares), además de la estufa tradicional como el dispositivo preferido por los usuarios. Por otra parte, las pruebas en los dispositivos revelaron un consumo promedio de combustible per cápita de 1.19 kg para la tecnología tradicional y 0.68 kg (ahorro del 42.7 % respecto al modelo convencional) para la Mirt. Además de esto, el estudio también demostró que el uso de la estufa ecológica reduce la emisión anual en 0.86 t de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e) equivalente por usuario.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

Los autores finalizaron el trabajo destacando los hallazgos entre los que se señaló a la leña proveniente de los bosques y plantaciones locales como el recurso energético preferido por los habitantes, también, se estimó un ahorro de combustible anual per cápita de 187.2 kg lo que corresponde a una emisión de 0.2 t de CO<sub>2</sub>.

En 2020, Oula Muok y Ochia Olweny [54] reportaron los resultados de un trabajo de investigación en el que realizaron la evaluación del rendimiento energético y el impacto ambiental de diferentes estufas ecológicas en comparación con el modelo típico en la región de Kimisu en Kenia, entre las que se incluyen los modelos Kuni Mbili, Unidad Integrada de Energía Doméstica (IDEU, por sus siglas en inglés) y Tres piedras. Este documento se designó con el título de “Assessment of Improved Cookstoves and its Implication on Energy Saving and Environmental Protection in Kisumu County, Kenya”.

Para esta investigación se aplicó una metodología de muestreo aleatorio que abarcó aspectos cualitativos, para lo cual se realizaron revisiones bibliográficas, entrevistas y discusiones grupales enfocadas. Sin embargo, también se tomaron en cuenta parámetros cuantitativos para lo que se llevaron a cabo entrevistas en hogares y evaluaciones de desempeño en los dispositivos a través de la prueba de funcionamiento en cocina (KPT) y el protocolo de cocción controlada (CCT), estos dos últimos procedimientos se repitieron durante tres días seguidos.

Los resultados evidenciaron que en el 74 % y 67 % de los hogares se emplea leña y carbón respectivamente, de la misma manera, se identificó a Tres piedras como la tecnología más utilizada en la región con un 73 % de usuarios, los cuales mencionaron en su mayoría que la zona ha sufrido deforestación por el uso de estos recursos como fuentes energéticas principales. Por otro lado, las evaluaciones cualitativas con KPT mostraron un consumo diario de leña de 6.23 kg en la tecnología tradicional, 4.17 kg para Kuni Mbili (33 % de ahorro respecto a Tres piedras) y 3.55 kg para IDEU (43 % de ahorro).

Por último, los autores resaltaron que el proyecto proporcionó datos invaluable sobre el potencial de ahorro energético de las tecnologías evaluadas, así como las desventajas entre los dispositivos. Además, destacaron que el estudio no se realizó contemplando todas las tecnologías del mercado local de Kenia, por lo que se requieren más investigaciones en el mismo campo.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

En 2021, Mifftah Fekadu y colaboradores [55] presentaron los resultados de un estudio en el que evaluaron el consumo de combustible y estimaron el potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en estufas ecológicas Mirt, en comparación con tecnologías tradicionales, implementadas en las regiones de Bure y Ameya en Etiopía. El artículo fue publicado bajo el título “Comparison of kitchen performance test on firewood consumption and emission of improved mirt and traditional three stone open cook stoves in Amaya, and Bure districts of Ethiopia”.

El estudio se llevó a cabo durante el horneado de Injera, un pan aplanado tradicional. Para esta investigación se siguió lo estipulado en el protocolo KPT. Como parte del procedimiento metodológico, se eligieron 100 viviendas con estufas Mirt y Tres piedras de cada región de estudio. Seguidamente, se aplicó un cuestionario a los hogares para obtener una visión general de la percepción sobre el uso de estufas Mirt mejoradas, su manejo, ventajas y desventajas. El consumo de leña, así como el contenido de humedad en base seca se evaluó cada tres días.

Los resultados cualitativos expusieron un nivel de satisfacción de aproximadamente el 75 % de los hogares de Bure y cerca del 49 % de las viviendas de Ameya. Asimismo, se identificó que falta de mantenimiento y un espacio inadecuado para la instalación de la estufa ocasionaron algunos de los problemas reportados por los usuarios, como la demora en el inicio de la combustión, entre otros. Por otro lado, la evaluación cuantitativa reveló que el uso de la tecnología mejorada permitió un ahorro de entre el 37.4 % y el 42 % en comparación con los fogones tradicionales. Asimismo, se determinó una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> en un rango del 37 % al 42 %.

Finalmente, los autores señalaron que el estudio evidenció que viviendas con tecnologías y un número similar de integrantes pueden presentar diferencias considerables en el consumo de combustible. Estas variaciones pueden atribuirse en gran medida, a la diversidad de costumbres culinarias, así como el tipo y contenido de humedad del combustible disponible en cada entorno. De manera paralela, se destacó la necesidad de promover la concientización sobre el mantenimiento adecuado del dispositivo para asegurar su óptimo funcionamiento.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

En 2021, Mifttah Fekadu et al. [56] publicaron un estudio denominado “Problems of Mirt, and potentials of improved Gonzie and traditional open cook stoves in biomass consumption and end use emission in rural wooden houses of Southern Ethiopia” para el cual evaluaron las estufas ecológicas Mirt y Gonzie implementadas en cuatro distritos de Etiopía.

Durante esta investigación, se empleó un enfoque compuesto por metodologías transversales y longitudinales, en el que finalmente participaron alrededor de 343 hogares de los cuales 43 contaban con estufas Mirt además del modelo tradicional (tres piedras). Por otro lado, se han evaluado a las estufas Gonzie y Tres piedras en 100 de las viviendas seleccionadas. Seguidamente, se aplicaron encuestas cualitativas sobre el uso, manejo de las tecnologías y especies leñosas preferidas por los habitantes locales. Posteriormente se evaluaron las tecnologías mencionadas a través de la prueba de rendimiento en cocina (KPT), para las cuales se midió la humedad y el consumo de combustible.

Los resultados de los autores indicaron que el uso de estufas Mirt y Gonzie mejoradas acortó el tiempo de cocción de alimentos y el consumo de combustible, de la misma forma, mejoró las condiciones ambientales de las cocinas al reducir la contaminación interna. Además, la KPT reveló que las estufas Mirt ahorraron el 34 %, 37.4 % y 42 % del consumo de leña en comparación con la tecnología tradicional en las regiones de Asgede Tsimbla, Bure y Ameya en comparación con Tres piedras, respectivamente. Sumado a lo anterior las estufas Gonzie ahorraron un 20.2 % con relación a tres piedras en el distrito de Dallocha.

Finalmente, los investigadores mencionan que las tecnologías de Mirt y Gonzie son muy aceptadas y apreciadas por la población local, esto debido a su ahorro de leña y a la mejor seguridad durante su uso en comparación con las estufas locales. Asimismo, se destacan a las prácticas culturales de cocción y manipulación de la leña como uno de los principales motivos por el que se observaron diferencias entre los resultados de la Mirt.

En 2022, Manaye et al. [57] evaluaron el ahorro de combustible y las emisiones de monóxido de carbono en dos tecnologías de estufas ecológicas implementadas en cocinas rurales (Mirt y Tikikil) comparadas con el modelo tradicional, este estudio se designó como “Fuelwood use and carbon emission reduction of improved biomass cookstoves: evidence

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

from kitchen performance tests in Tigray, Ethiopia” y se desarrolló en una de las regiones del norte de Etiopía. Previo a las evaluaciones se aplicaron técnicas de muestreo de múltiples etapas, con las que se determinó un tamaño de muestra de 86 hogares con estufas Mirt y 53 con Tikikil.

Posteriormente se aplicaron encuestas cualitativas de acuerdo con la KPT, también se registró la masa de tres lotes de leña con antelación, así como el contenido de humedad de la biomasa, al final de cada día se registró la cantidad del recurso restante. Dicho procedimiento se repitió durante tres días consecutivos. Con respecto al CO<sub>2</sub> liberado, se determinó la reducción de este contaminante con base en lo establecido en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y el Marco de la Convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CDM, por sus siglas en inglés).

Los resultados revelaron que la Mirt redujo el consumo anual de leña seca y la liberación de CO<sub>2</sub> en un 34.6 % y 20 % respectivamente, por otro lado, la Tikikil disminuyó el mismo gasto anual y el CO<sub>2</sub> generado en un 18 % y 15 %. Finalmente, los autores concluyeron que las estufas ecológicas han contribuido en la mitigación de la cantidad de leña utilizada, la frecuencia de recolección de leña, entre otros benéficos. Es importante remarcar la escasez de información sobre este tema en Etiopía, por lo que resulta necesario realizar más investigaciones.

En 2022, Munini Munyao et al. [58] evaluaron la contaminación del aire en interiores (IAP, por sus siglas en inglés) como resultado de la combustión de leña de las diferentes tecnologías de estufas tradicionales (Tres piedras y Chepkube) y ecológicas (Rocket y Cheprocket) empleadas en dos condados de Kenia, por otro lado, también se realizó la evaluación comparativa del consumo de combustible por el uso de dichos dispositivos. Este trabajo fue denominado como “Assessment of Improved Biomass Cookstove Technologies and Kitchen Characteristics on Indoor Air Quality and Fuel Consumption in Rural Settings of Western, Kenya”. En primer lugar, se utilizó un método de muestreo de multietapas con el cual se determinó una muestra de 204 hogares y 56 cocinas.

Acorde a lo antes mencionado se aplicaron encuestas y se realizaron mediciones de la concentración interior del monóxido de carbono (CO) y material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) para posteriormente realizar una predicción de la contaminación a través de un análisis de

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

regresión múltiple. Sumado a lo anterior también, se empleó la prueba de funcionamiento en cocina (KPT); durante la evaluación se midió la humedad de la leña y el consumo de combustible de cada estufa.

Los resultados de la investigación demostraron que la leña y los residuos de cultivos son las principales fuentes energéticas implementadas en aquellos hogares con estufas Cheprocket, Rocket y Chepkube, los cuales consumían diariamente 1.5 kg (14.9 %), 1.3 kg (12.9 %) y 2.8 kg (27.7 %) menos combustible que las cocinas con estufas de tres piedras, de igual forma se estimó un potencial de ahorro de leña anual de 243,000 t, 15,000 t y 23,000 t, respectivamente. Por otro lado, los análisis estadísticos revelaron que las cocinas con suelo de cemento y bien ventiladas se asociaron con menores concentraciones de contaminantes en comparación con aquellas que tenían suelos de barro.

Los investigadores finalizaron mencionando que las estufas ecológicas lograron una reducción considerable en el consumo de leña con relación a los dispositivos tradicionales y por consiguiente contribuyeron a la conservación del ecosistema local. De la misma manera, resaltaron que la alta dependencia de las tecnologías tradicionales de baja eficiencia, las prácticas culinarias y los diseños inadecuados de las cocinas provocaron la acumulación de altos niveles de contaminación en el interior en las viviendas. Finalmente mencionaron que la estufa Chepkube tradicional es una innovación local con un potencial de ahorro de leña incluso mayor al de las estufas ecológicas evaluadas.

Actualmente se han realizado limitados estudios en campo sobre las estufas ecológicas implementadas en México, estos trabajos se han llevado a cabo en su mayoría empleando metodologías comparativas no estandarizadas para aplicarse en campo y han tenido entre sus objetivos medir los niveles de adopción, los impactos asociados al uso de la tecnología y el consumo de combustible.

### **1.2.5. Estudios en campo sobre las estufas ecológicas implementadas en México**

Entre las investigaciones en campo a nivel nacional más recientes se incluye el trabajo desarrollado por Vázquez Calvo et al. [4] quienes en 2016 publicaron los resultados de un estudio titulado “Estufas Lorena: uso de leña y conservación de la vegetación”, este trabajo se desarrolló en las comunidades rurales de Santa Ana Tamazola y Santa María la

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

Concepción, pertenecientes al estado de Puebla y tuvo entre sus objetivos evaluar el nivel de adopción de las estufas Lorena, estimar el consumo de combustible para cada tecnología presente, identificar las principales especies vegetales utilizadas como combustible y comparar los resultados de los dispositivos mejorados respecto a los tradicionales.

En este estudio los investigadores establecieron como unidad de análisis a las familias campesinas de la región evaluada, por consiguiente, emplearon una metodología dividida en dos etapas. La primera fase del proyecto consistió en una revisión bibliográfica sobre el estado del arte, la aplicación de una técnica de muestreo para determinar el número de familias a entrevistar y la preparación de instrumentos para la recolección de datos (encuestas, observación participante y pláticas con informantes clave). Posteriormente, se llevó a cabo la etapa en campo en la que se realizaron múltiples visitas al área de evaluación, se aplicaron cuestionarios semiestructurados (incluyen preguntas abiertas y cerradas de carácter informal) y se realizaron estimaciones de los volúmenes de leña típicamente empleados al cocinar. Finalmente, se empleó una metodología estadística para realizar el análisis de la información reunida.

Los resultados evidenciaron que la mayoría de las familias realiza un uso mixto de los dispositivos en la preparación de desayunos y comidas, utilizando preferentemente el fogón tradicional, seguido de la Lorena y las estufas de gas, en cuanto a las especies forestales comúnmente empleadas como combustible se incluyen la cubata blanca (*Acacia cochliacantha*), el palo de Brasil (*Paubrasilia echinata*), el tlahuitole (*Lysiloma divaricatum*) y otros similares. De acuerdo con las encuestas, solo el 55 % de los hogares continúa empleando las estufas mejoradas debido a diversas circunstancias entre las que se incluyen la escasez de los recursos, la percepción de un mejor sabor al utilizar la tecnología tradicional y el traslado de las cocinas. Otro hallazgo destacable es la medida de leña empleada por usuarios y vendedores denominada “carga” (aproximadamente de 80 kg), a partir de estos datos se estimó que al emplear la estufa Lorena se obtendrá un ahorro de combustible entre 11.06 y 11.39 cargas de leña al año (cerca del 26 %) respecto al dispositivo tradicional.

Los investigadores finalizaron destacando el buen nivel de aceptación de las estufas Lorena implementadas (superior al 50 %) y las ventajas que conlleva su uso de acuerdo

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

con el ahorro estimado, las cuales engloban la reducción del gasto económico y de los tiempos de recolección del biocombustible utilizado, la mejora en la calidad de vida de los usuarios, así como la mitigación del impacto en la vegetación local.

En 2016, Flores Sotelo [59] presentó los resultados de una investigación denominada “Alcances ambientales de la adopción de la estufa ahorradora de leña Tlecalli” en dos comunidades rurales del Estado de Morelos, México”, este trabajo tuvo entre sus objetivos identificar los beneficios ambientales asociados al uso de la tecnología, además de las prácticas y costumbres de uso del dispositivo implementado en las comunidades de Barranca Honda y Cuentepec, en estado de Morelos.

Para este trabajo el autor aplicó un total de 83 cuestionarios en ambas comunidades, del mismo modo se empleó el método de “observación participante” que consistió en llevar a cabo 12 entrevistas formales, 12 pruebas de eficiencia a través de protocolos estandarizados (CCT y KPT), pláticas sobre las actividades cotidianas y la recopilación de experiencias de uso mediante la observación y la captura de imágenes y videos. Finalmente se realizó el análisis de la información recabada mediante hojas de cálculo de Excel.

Los resultados revelaron un nivel de adopción de las estufas Tlecalli entre un 85 % y 95 % en las dos zonas de estudio, con respecto al uso de los dispositivos, se observó que los usuarios empleaban múltiples tecnologías de manera combinada; entre estas se incluyen las estufas de gas, los fogones y la tecnología implementada, siendo el guamúchil (*Pithecellobium dulce*), el huizache (*Acacia farnesiana*), el cuahuilote (*Guazuma ulmifolia*), el huaje o guaje (*Leucaena leucocephala*) y el tehuixtle (*Caesalpinia cacalaco*) las principales especies forestales empleadas localmente para la preparación de diversas recetas, entre las que se incluyen tortillas, nixtamales y frijoles. En relación con el ahorro de combustible, se registró una reducción entre un 35 % y un 45 % en la frecuencia de compra y recolección de los recursos al emplear la estufa Tlecalli y el fogón alternadamente. Por otro lado, de acuerdo con las entrevistas realizadas, se identificó que la mayoría de los individuos encuestados afirmaron que al utilizar la Tlecalli se mantuvo un ambiente más agradable en el interior de las cocinas, ya que estas liberaban muy poco o nada de humo dentro de las zonas de cocinado, en tal sentido, se minimizó la probabilidad de que los usuarios desarrollen enfermedades respiratorias.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

El investigador finalizó mencionando que las estufas Tlecalli implementadas han presentado beneficios significativos con relación a la tecnología tradicional, lo que implica que dichos dispositivos son aptos para implementarse en comunidades rurales; entre las mejoras identificadas se destaca la disminución de más del 60 % de la contaminación ambiental generada al emplear el dispositivo mejorado.

En 2017, Fragoso Estévez [60] publicó una tesis titulada “Uso de estufas mejoradas de leña y su impacto a la salud en niños menores de 5 años en San Luis Potosí”, dicho estudio tuvo como objetivo identificar y comparar el impacto en la salud por el uso de estufas mejoradas y tecnologías tradicionales mediante el monitoreo de la incidencia de enfermedades respiratorias entre grupos de niños menores de cinco años, pertenecientes a distintas comunidades rurales distribuidas en tres regiones del estado de San Luis Potosí (Centro, Altiplano y Huasteca).

En esta investigación el científico utilizó un cuestionario de selección para identificar aquellos hogares que cumplieran con el criterio de: viviendas de una misma localidad cuyos habitantes incluían madres e infantes menores de cinco años que cuenten con una estufa mejorada, así como aquellos hogares que solo cuenten con la tecnología tradicional. Posteriormente, se visitaron los hogares seleccionados en dos ocasiones, con el objetivo de examinar el estado de salud de los infantes mediante exámenes físicos y cuestionarios.

Las encuestas revelaron que solo el 45.7 % de las 632 viviendas consideradas han sido beneficiadas por un programa de estufas ecológicas. Respecto a los patrones de uso de los dispositivos, se determinó que el 26 % de la población beneficiada continúa empleando únicamente el fogón, el 33.5 % solo la estufa mejorada, el 16.6 % la estufa de gas, y el resto realiza un uso mixto de los dispositivos (fogón-estufa mejorada, fogón-estufa de gas, estufa mejorada-estufa de gas, fogón-estufa mejorada-estufa de gas). En relación con las afecciones de salud, se observó una reducción del 39 % en la prevalencia de enfermedades respiratorias como la tos, una disminución del 46 % para el caso de las flemas y una mitigación del 58 % de los casos de fiebre al emplear la tecnología mejorada.

Finalmente, el autor concluyó resaltando que la estufa evaluada ofrece seguridad durante su utilización a la salud de los usuarios beneficiados por los programas de implementación de estufas mejoradas, ya que se observó una reducción en la duración de

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

los síntomas relacionados con enfermedades respiratorias con el paso del tiempo. Por otra parte, se destaca que los beneficios mencionados serían más evidentes si los programas de implementación fueran más completos y los dispositivos se emplearan de manera más adecuada.

En 2019, Schilman et al. [61] publicaron una investigación titulada “A follow-up study after an improved cookstove intervention in rural Mexico: Estimation of household energy use and chronic PM<sub>2.5</sub> exposure” en la que realizaron un estudio de seguimiento sobre la conservación, el uso energético y las emisiones anuales de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) de las estufas Patsari implementadas entre 2005 y 2006 en zonas altas de Michoacán, este trabajo se consideró una población de estudio conformada por mujeres jóvenes de seis comunidades rurales.

Acorde a lo antes mencionado, los científicos realizaron una investigación prospectiva de 9 años en la que emplearon entrevistas estructuradas (preguntas abiertas para la recopilación de información específica) con el fin de recabar información retrospectiva desde 2005 hasta 2013, estos diálogos abordaron los cambios más importantes relacionados con el uso de la nueva tecnología como son el historial de reparación y/o modificaciones, el estado y el nivel de uso de la estufa Patsari, así como los modelos nuevos adquiridos; otros datos recopilados son los cambios en las cocinas, la ventilación, la cantidad de personas que consumen los alimentos preparados, el tiempo dedicado a cocinar y las prácticas de uso de la estufa. Seguidamente, se realizó un análisis estadístico y descriptivo de la información reunida con el fin de comparar entre sí los resultados de las comunidades estudiadas; se definió una variable que simula el patrón de uso energético a lo largo del estudio, posteriormente se desarrolló y se empleó un modelo de exposición para estimar la concentración anual de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) a la que se sometieron los usuarios en cada año de seguimiento.

El análisis de los datos recopilados evidenció que la mayoría de los individuos pertenecían a la etnia purépecha, mientras el resto era mestizo. Asimismo, se reveló que un total de 177 (69 % del total) de las estufas implementadas fueron desmanteladas, y 40 (15 %) dejaron de usarse durante el período de seguimiento (2005-2013). Además, se identificó que el 50 % de los dispositivos implementados ya no se encontraban en uso después de los primeros 4 años. Paralelamente, se registró un pico de aceptación entre un

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

85 % y un 90 % en 2006, durante el cual casi el 50 % de las mujeres mestizas y más del 60 % de usuarias purépechas combinaban el uso de la tecnología mejorada y la tradicional, mientras que el porcentaje más bajo de uso exclusivo del fuego abierto fue del 12 %. Posteriormente, entre 2009 y 2013 se observó una clara disminución en el uso del modelo implementado. Con respecto a la contaminación crónica por  $PM_{2.5}$ , se estimó que los usuarios se expondrían a concentraciones entre 51 y 319  $\mu g/m^3$  al utilizar la Patsari; de 89 a 305  $\mu g/m^3$  al emplear el fogón; y de 76 a 378  $\mu g/m^3$  para el uso combinado.

Los autores finalizaron resaltando los altos niveles de adopción registrados al comienzo del estudio y el tiempo de supervivencia de 50 % posterior a los cuatro años. También se reveló que los cambios en los hogares son los principales factores que limitan la conservación y el uso de las tecnologías mejoradas. De igual forma, se enfatiza que los programas de estufas mejoradas requieren un seguimiento para asegurar el correcto mantenimiento, reparación y reemplazo de las tecnologías implementadas a fin de apoyar su uso sostenido. Por otro lado, se destaca que los niveles estimados de  $PM_{2.5}$  superaron los límites establecidos por la OMS, por lo que se propone mejorar los diseños con el fin de adaptarse a los estándares mencionados.

En 2023, Bello Román et al. [62] publicaron un trabajo denominado “Variación en el consumo de leña y factores que lo determinan en una comunidad campesina al suroeste del estado de Morelos, México” en el que evaluaron el consumo de leña y las variaciones ocasionadas por los cambios climáticos; identificaron las principales especies vegetales utilizadas como combustible y estimaron la cantidad de biomasa leñosa que proveen los sitios de obtención en las inmediaciones de la comunidad.

Por consiguiente, los investigadores realizaron una serie de visitas a la comunidad en las que se aplicaron 33 entrevistas semiestructuradas, estos cuestionarios tenían el propósito de recabar datos específicos de cada vivienda (número de integrantes, género, edades, actividades productivas desarrolladas), así como características de las especies vegetales utilizadas como combustible, el lugar de obtención y los periodos de recolección. Al mismo tiempo, se realizaron mediciones del consumo de leña en 6 hogares empleando la técnica denominada “estimación por declaración del usuario”, que consistió en preguntar a los encuestados la cantidad aproximada de biomasa leñosa empleada típicamente.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

Finalmente, se realizó un análisis estadístico para evaluar los factores con un impacto directo en el uso de los dispositivos.

Los resultados arrojaron un consumo total anual de leña de 13,338 kg para las 6 familias evaluadas, asimismo se identificó al tepehuaje (*Lysiloma acapulcense*), el caulote (*Guazuma ulmifolia*) y el palo blanco (*Lysiloma divaricatum*) como las principales especies vegetales utilizadas, las cuales son obtenidas de cuatro zonas de recolección como son el monte, la milpa, el potrero, y el patio. Por su parte, el análisis estadístico demostró que las familias con menos integrantes consumieron más combustible en comparación con los hogares con mayor cantidad, sin embargo, esto se atribuyó a la ocupación de los individuos en cada hogar; de manera similar se obtuvo un mayor consumo de combustible durante la temporada de invierno en comparación con la estación de lluvias, esto se debe a la mayor frecuencia de uso durante los meses más fríos.

Los autores concluyeron mencionando que el consumo de combustible se ve afectado por los cambios estacionales y las características sociodemográficas de los integrantes en cada familia entre las que destacan la ocupación, la edad y el sexo. Por otro lado, se descubrió que la preferencia de los combustibles empleados localmente está determinada principalmente por la disponibilidad y las ocupaciones de los individuos. Finalmente, se destacó que el estudio contribuyó a la estimación de las tasas de extracción de los recursos forestales, así como a la identificación de las principales especies dendroenergéticas empleadas por los habitantes locales.

Es importante mencionar que se han identificado un número limitado de estudios en campo sobre los modelos de estufas ecológicas implementadas en Chiapas y Oaxaca.

### **1.2.6. Investigaciones en campo sobre las estufas ecológicas instaladas en el estado de Chiapas**

Entre los estudios realizados en el estado de Chiapas se encuentra el de Ramírez Rodas [63] quien, en 2014, publicó un documento de tesis titulado “Diseño, construcción, implementación y evaluación en campo de una estufa ecológica Lekil Vaj”, esta investigación tuvo entre sus objetivos determinar el consumo de leña, la concentración de las emisiones intramuros de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), además de los niveles de monóxido

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

de carbono, y tiempos de cocción de alimentos en una vivienda de la comunidad de Tierra Blanca, Chiapas. De acuerdo con lo anterior, se emplearon diversas metodologías entre las que se incluyeron: la prueba de ebullición de agua (WBT), el protocolo de emisiones intramuros (PEI) y la metodología de comportamiento térmico del comal (PCTC).

Los resultados revelaron que la temperatura en el comal de la Lekil Vaj mostró un valor máximo de 442 °C. Por otro lado, con la prueba de cocción de alimentos se obtuvo un consumo de combustible de 1.5 kg con Lekil Vaj y 5.2 kg con el fogón tradicional, además el tiempo de cocción fue de 255 y 206 minutos, respectivamente. Con respecto a las pruebas de emisiones intramuros, se observaron concentraciones promedio de 182.2 ppm de CO<sub>2</sub> y 0 ppm de CO al emplear la estufa ecológica, por su parte, al usar el dispositivo tradicional, estos valores fueron de 414.5 ppm en el caso del CO<sub>2</sub> y de 178.9 ppm para el CO.

El autor finalizó el trabajo mencionando que desarrolló e implementó un modelo innovador de estufa de leña con un potencial de ahorro del 70 % en comparación con los dispositivos cotidianos en la zona. Además, resaltó su contribución a la reducción de las emisiones de efecto invernadero generadas.

En 2016, Jiménez Romo [8], presentó una tesis denominada “Apropiación, uso y adaptación de las Estufas Ahorradoras de Leña en Amatenango del Valle” en la que analizó las prácticas de uso de las tecnologías ahorradoras de cocción con leña, su nivel de aceptación y la perspectiva de los usuarios sobre los mecanismos de difusión e implementación de las estufas ecológicas implementadas en la comunidad de Amatenango del Valle, Chiapas.

Para el desarrollo de esta investigación, el autor seleccionó el área de estudio contemplando regiones con un bajo desarrollo económico y social que han sido beneficiadas por un programa de implementación de estufas ahorradoras de leña; para la recopilación de información se empleó un modelo de análisis basado en cuatro dimensiones: social, técnica, personal y externa; considerando lo anterior se establecieron las variables e indicadores que permitieran alcanzar los objetivos, entre las que se encuentran: la frecuencia, condiciones y variedad de uso de los dispositivos, el nivel de satisfacción, las adecuaciones culturales y técnicas, además de la participación de los

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

usuarios en el proceso de implementación. Posteriormente, se realizaron visitas a la localidad en las que se proporcionaron encuestas estructuradas y se realizaron revisiones estructurales de las tecnologías existentes, adicionalmente se registraron las experiencias cotidianas reportadas en un diario de campo, finalmente se realizó un análisis estadístico de la información recabada empleando el software SPSS Statistics v20.

Los resultados revelaron que el 91 % de los usuarios emplean múltiples dispositivos entre los que se encuentran el fogón abierto, la estufa mejorada de comal, la estufa de gas y el horno de microondas. Es importante destacar que el 85 % de los encuestados emplean la estufa mejorada, mientras que el 15 % ha optado por otra tecnología por distintos motivos, entre los que se incluyen la dificultad para acostumbrarse, los altos tiempos de cocción y las bajas temperaturas alcanzadas, no obstante, previo a la implementación de dichos dispositivos cerca del 95 % de la población empleaba exclusivamente el fogón abierto. En relación con la implementación de los dispositivos, se reveló que la mayoría de los dispositivos mejorados proviene de instituciones no gubernamentales y gubernamentales, además de que aproximadamente el 8 % de los individuos ha adquirido una tecnología mejorada con sus propios recursos.

El autor concluyó resaltando la importancia de la participación de los usuarios en los programas de implementación, ya que permite a los investigadores poder identificar las necesidades tecnológicas y culturales, del mismo modo hace posible transmitir las técnicas adecuadas para realizar el correcto uso de las tecnologías de cocción mejoradas, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los usuarios y reducir los impactos ocasionados al medio ambiente.

El estado del arte sobre la evaluación en campo de las tecnologías de cocción con leña ha demostrado que el uso adecuado de las estufas mejoradas beneficia la calidad de vida de los usuarios, del mismo modo, se contribuye a la mitigación de las problemáticas medioambientales ocasionadas por el uso de fogones abiertos. En contraste, diversos autores han concluido que es necesario ampliar el alcance de los programas de implementación con el fin de poder obtener resultados más realistas en los estudios realizados.

# CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

## 1.3. Planteamiento del problema

El crecimiento de la demanda actual de leña implica consecuencias negativas como la deforestación, la pérdida de biodiversidad y el calentamiento global, entre otros [64]. Hoy en día, esta forma de biomasa es el principal recurso energético utilizado en México; aproximadamente 28 millones de habitantes (23 % de la población total) emplean este recurso para la calefacción y la cocción de alimentos [20].

Desde la antigüedad, la leña se ha empleado como combustible en fogones tradicionales; sin embargo, la operación de estos dispositivos conlleva múltiples desventajas, como los altos consumos de biomasa, las bajas eficiencias térmicas, las elevadas emisiones de gases nocivos, entre otras [19, 22, 65]. Una alternativa a la tecnología convencional son las estufas ecológicas, las cuales permiten solucionar y minimizar algunas de las problemáticas de las tecnologías habituales [3, 5, 6, 23, 25, 60, 66]. Hoy en día, en México se han llevado a cabo diversas campañas de implementación a nivel nacional para estos dispositivos, entre los que destacan los modelos Patsari y Onil [5, 7].

La evaluación de estufas de leña se realiza mediante la aplicación de protocolos estandarizados (laboratorio y campo), entre estas metodologías destacan aquellas orientadas al funcionamiento en campo, ya que estas permiten medir el rendimiento que los usuarios obtienen en las tecnologías implementadas [48, 49, 50, 67]. Cabe mencionar que las recientes investigaciones han reportado que las prácticas de cocinado inadecuadas limitan el rendimiento adecuado de los dispositivos. Por otro lado, diversos autores remarcan la importancia de realizar más investigaciones sobre la influencia del transcurso de las estaciones en el desempeño de las nuevas tecnologías de cocción [52, 53].

Actualmente, en la región de Chiapas se han implementado principalmente las estufas ecológicas “Enerchía”, “Lekil Vaj”, “Lorena” y “Ceta”, cabe destacar que estos dos primeros modelos se desarrollaron en el IIIER-UNICACH<sup>2</sup> y hasta el año 2016 se reportó la

---

<sup>2</sup> Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

# CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

instalación de más de 2500 unidades para el caso de la “Enerchía” [68]. En los últimos años se han llevado a cabo evaluaciones bajo condiciones de laboratorio en algunos de los modelos mencionados anteriormente; recientemente investigadores del IIIER-UNICACH desarrollaron un nuevo dispositivo que, de acuerdo con los estándares mencionados, logra un mejor rendimiento en comparación con otras estufas de leña. Este nueva tecnología se implementó en la comunidad de San Francisco del mar, Oaxaca, no obstante, hasta el momento no se han realizado pruebas que contemplen protocolos internacionales sobre el funcionamiento de esta estufa en un ambiente real de operación.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. General

Evaluar una estufa ecológica de doble combustión Vilma en condiciones reales de operación, utilizando el protocolo de funcionamiento en cocina (KPT) y la prueba de emisiones intramuros (PEI) con el fin de determinar el consumo de combustible, las concentraciones de gases intramuros, el impacto económico y desarrollar un manual de usuario de la tecnología evaluada.

### 1.4.2. Específicos

- ❖ Realizar un estudio cualitativo del patrón de uso del combustible en una estufa ecológica de doble combustión Vilma y compararlo con un fogón tradicional.
  - ✓ Aplicación del cuestionario previo de la KPT sobre el uso de los combustibles y las tecnologías de cocción.
  - ✓ Aplicación del estudio cualitativo del protocolo KPT, sobre el uso de la tecnología evaluada y el fogón tradicional.
  - ✓ Comparación de los resultados de la estufa ecológica de doble combustión y el fogón.
  
- ❖ Evaluar y comparar el consumo de combustible entre una estufa ecológica de doble combustión Vilma y un fogón tradicional.
  - ✓ Revisión bibliográfica de la prueba de rendimiento en cocina (KPT).
  - ✓ Identificación de las variables a medir.

## CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

- ✓ Identificación y adquisición de los equipos y herramientas necesarios para la aplicación del protocolo en las tecnologías.
  - ✓ Aplicación del estudio cuantitativo del protocolo KPT, en la tecnología evaluada y en un fogón tradicional.
- ❖ Determinar la concentración de los gases intramuros generados por la combustión de la leña en el dispositivo evaluado (CO, CO<sub>2</sub>, y PM<sub>2.0</sub>) y compararla con los límites permisibles establecidos por diversas organizaciones.
- ✓ Revisión bibliográfica de la prueba de emisiones intramuros (PEI).
  - ✓ Identificación de los límites establecidos por la OMS y REHVA.
  - ✓ Identificación de los equipos y herramientas para llevar a cabo las evaluaciones.
  - ✓ Aplicación del PEI en las tecnologías.
- ❖ Calcular el impacto económico del uso de la estufa ecológica evaluada, en comparación con los dispositivos tradicionales utilizados en la zona.
- ✓ Cálculo del costo del combustible invertido por cada kg de alimento cocinado en la estufa ecológica de doble combustión y el fogón tradicional.
  - ✓ Estimación del costo potencial al utilizar la estufa ecológica en comparación con el fogón.
  - ✓ Cálculo del tiempo de retorno de la inversión económica realizada al fabricar la estufa ecológica de doble combustión.
- ❖ Desarrollar un manual de usuario contemplando los resultados generados durante la evaluación de la estufa ecológica.
- ✓ Delimitación del contenido del documento.
  - ✓ Establecimiento del formato del documento.
  - ✓ Redacción de los contenidos de las secciones del documento.

# CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

## 1.5. Justificación

La evaluación de las tecnologías de estufas de leña se divide en dos etapas. La primera fase consiste en la aplicación de pruebas en laboratorio, las cuales se complementan, después de la implementación de los dispositivos, con pruebas en campo. Particularmente, las metodologías de campo revelan el desempeño de los dispositivos implementados en un ambiente real de operación [25, 67, 69, 70]. Cabe destacar que la información recopilada durante estas pruebas resulta muy valiosa para el desarrollo de nuevos dispositivos, así como la optimización de los ya existentes. Tomando en cuenta lo anterior, se empleó un protocolo internacional complementado con una metodología local, para evaluar el desempeño real de una estufa ecológica de doble combustión Vilma implementada en la comunidad de San Francisco del Mar, Oaxaca.

## 1.6. Hipótesis

Los resultados de las evaluaciones de laboratorio, reportadas por Arreola Gómez C., demostraron que la estufa ecológica de doble combustión Vilma presenta un mejor rendimiento en el ahorro de combustible y menores emisiones intramuros en comparación con otras estufas ecológicas. Tomando en cuenta lo anterior, se espera obtener un resultado similar en las pruebas de campo [9].

# CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Introducción

En este capítulo se presentan las bases teóricas implicadas durante el desarrollo del presente estudio. Esta información se ha incorporado a través de un conjunto de enunciados y fórmulas que explican los fenómenos involucrados.

Inicialmente, se abordan algunos conceptos básicos con el fin de brindar un panorama general sobre el tema estudiado, partiendo de la definición de biomasa y sus principales propiedades energéticas, la bioenergía y los métodos termoquímicos de conversión energética, centrándonos en el proceso de combustión, así como en los elementos involucrados y las condiciones necesarias para que se lleve a cabo. Seguidamente, se describen las principales tecnologías de estufas ecológicas implementadas a nivel nacional y estatal, y la estufa Vilma, desarrollada en el IIIER-UNICACH. Además, se presenta una de las metodologías más utilizadas para la evaluación en campo de estos dispositivos. Por último, se abordan criterios para la evaluación de proyectos de inversión, como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), la relación costo-beneficio (C/B) y el período de recuperación de la inversión (PRI).

### 2.2. Biomasa

La biomasa es un recurso energético renovable procedente de los seres vivos (plantas y animales) que se origina en los ecosistemas a través de procesos naturales (como la poda natural de bosques, restos de frutos, residuos de animales y afines), o de forma antropogénica, mediante actividades humanas (como los cultivos, la tala de bosques, la crianza de ganado, la elaboración de muebles de madera, entre otras) [38, 71-73].

Los recursos biomásicos se clasifican de diversas formas considerando sus características y propiedades, como el origen, el estado de agregación, la composición, el contenido de humedad, entre otros criterios [73, 74]. En la Figura 2.1 se observa la clasificación de los recursos de acuerdo con su origen.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

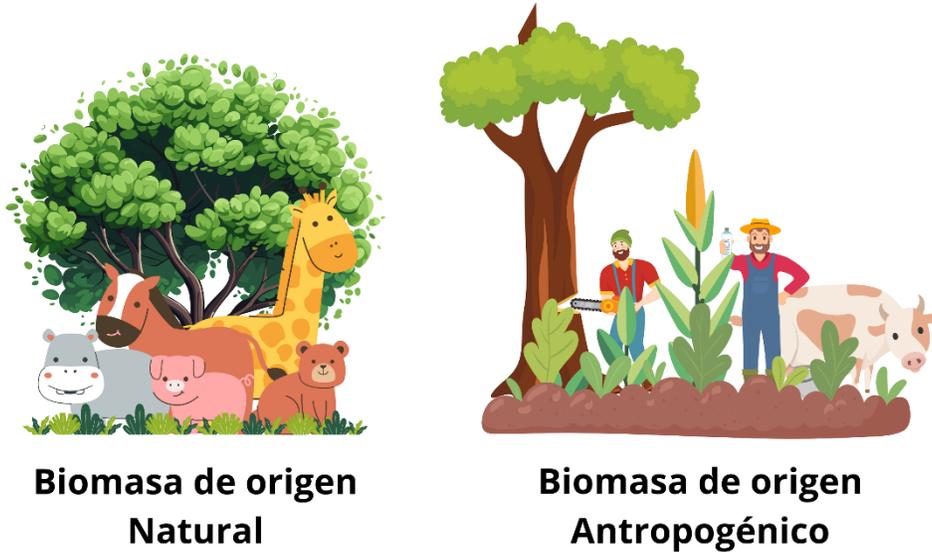


Fig. 2.1 — Clasificación de la biomasa de acuerdo con su origen.

El método óptimo de aprovechamiento de estos recursos dependerá de las características de la materia prima, como se detalla a continuación.

### 2.2.1. Propiedades fundamentales de la biomasa

Las propiedades fundamentales de la biomasa determinan su rendimiento y eficiencia en diversas aplicaciones energéticas. Entre estas características se encuentran la composición química, el contenido de humedad y el poder calorífico. A continuación, se abordan estos conceptos y sus implicaciones.

#### 2.2.1.1. Composición química

Para lograr producir energía de forma eficiente, es muy importante conocer la composición química de los recursos, ya que esta tiene un gran impacto en la calidad del producto final. Específicamente, la biomasa lignocelulósica o herbácea se compone de cinco elementos principales: celulosa (30 %-50 %), hemicelulosa (23 %-32 %), lignina (15 %-25 %), volátiles y cenizas (porcentaje restante) [73, 75].

Los principales componentes químicos de interés en la conversión energética de la biomasa herbácea son el contenido de cenizas, las partículas volátiles y la lignina. El alto

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

contenido de cenizas y volátiles generalmente tiene un efecto negativo en la conversión de biomasa, ya que reduce la eficiencia de los procesos y aumenta el nivel de contaminación generado. La lignina, por su parte, generalmente afecta negativamente la producción de etanol; sin embargo, también puede aumentar el calor obtenido durante la combustión [73, 76].

### 2.2.1.2. Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de energía almacenada por unidad de masa de un combustible específico, la cual se libera sometiendo dicha sustancia a diversos procesos [77]. De acuerdo con la literatura se han identificado dos tipos de poderes caloríficos, como se menciona a continuación:

- ❖ **Poder calorífico superior o poder calorífico bruto (PCS):** El PCS (o HHV, por sus siglas en inglés) es la cantidad total de energía térmica que puede liberar una cantidad específica de combustible [78].
- ❖ **Poder calorífico inferior o poder calorífico neto (PCI):** El PCI (o LHV, por sus siglas en inglés) es la cantidad total de energía aprovechable, excluyendo la energía necesaria para condensar la humedad presente en el combustible, entre otras pérdidas [78].

### 2.2.1.3. Densidad energética

La densidad energética define cuánta energía puede obtenerse de una cantidad específica de biomasa, en función del poder calorífico y su densidad física. Este parámetro es importante ya que influye en la eficiencia, el costo, el transporte y el almacenamiento de los recursos para aplicaciones energéticas. En otras palabras, una materia prima con alta densidad energética permite almacenar y transportar más energía en menos espacio, lo cual es beneficioso para reducir costos y optimizar el almacenamiento [79].

### 2.2.1.4. Contenido de humedad

El contenido de humedad representa la fracción, expresada como porcentaje, de la masa total de un combustible que está ocupada por agua. Este parámetro relaciona el agua

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

presente en la biomasa con la cantidad de materia seca. Además, este puede medirse tomando como base una masa seca (h) o húmeda (H). Las cuales se definen a continuación [73, 80].

### 2.2.1.4.1. Base seca

La humedad en base seca (h) se define como el porcentaje de agua contenida en la biomasa en relación con la porción seca de combustible. En este sentido, un material con  $h = 200 \%$  tendrá una cantidad de agua equivalente al doble de la masa seca. Este valor se puede obtener a través de la ecuación 1 [81].

$$h = 100 * \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$P_h =$  Masa total del combustible (incluyendo la humedad) (g)

$P_s =$  Masa del combustible seco (sin considerar la humedad) (g)

### 2.2.1.4.2. Base húmeda

El porcentaje de humedad en base húmeda (H) se define como el contenido de agua en la biomasa en relación con la masa total del combustible (incluyendo la humedad). En este sentido, un valor de  $H = 100 \%$  indica que el material está constituida únicamente por agua, mientras que un valor de  $H = 0 \%$  señala que la materia está libre de humedad. Para obtener este valor, se debe emplear la ecuación 2 [81].

$$H = 100 * \frac{P_h - P_s}{P_h} = \frac{\text{Masa del agua en el combustible}}{\text{Masa total del combustible}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$P_h =$  Masa total del combustible (incluyendo la humedad) (g)

$P_s =$  Masa del combustible seco (sin considerar la humedad) (g)

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Conocer este último parámetro es de gran importancia, ya que cuanto menor sea el contenido de humedad, mayor será la cantidad de energía útil disponible. En este sentido, se clasifica como biomasa húmeda toda aquella materia orgánica con  $H \geq 60\%$ , mientras que se considera biomasa seca cuando  $H$  es inferior a este rango. Es importante destacar que la mayoría de los procesos de transformación energética requieren valores inferiores al  $30\%$  en base húmeda, ya que el uso de materia prima con valores superiores al porcentaje mencionado requiere la implementación de métodos de acondicionamiento previos [73, 81, 82].

### 2.2.1.5. Densidad aparente

La densidad aparente es una medida del volumen externo de sólidos granulares o polvos, la cual, a diferencia de la densidad absoluta, considera el espacio ocupado por huecos o poros como parte del volumen total del sólido. En el caso de la biomasa, este parámetro mide la disponibilidad real del combustible por unidad de volumen y proporciona datos útiles para el diseño de sistemas de aprovechamiento y almacenamiento de estos recursos [80, 83].

La energía obtenida a través de la biomasa es una forma del aprovechamiento de la materia orgánica; esta puede aprovecharse en forma de calor o en forma de biocombustible. En el siguiente apartado definimos el concepto y origen de la bioenergía en las plantas.

### 2.2.1.6. Contenido de cenizas

El porcentaje o contenido de cenizas es la porción de materia sólida no combustible del total de materia prima expresada en unidades de porcentaje; las cenizas provenientes de plantas están conformadas por diversos minerales entre los que se incluyen el calcio, el potasio y el magnesio. La leña típicamente tiene un porcentaje de cenizas de aproximadamente el  $1\%$ ; sin embargo, este valor puede ser mayor para el caso de las especies arbóreas usualmente empleadas para la producción de biocombustibles líquidos [80, 84].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Actualmente, los recursos biomásicos representan una fuente de energía renovable a partir de la que se obtiene la bioenergía, la cual puede utilizarse para generar calor, electricidad y otros fines. A continuación, se detalla este concepto.

### 2.3. Bioenergía

La bioenergía se define como la energía procedente del aprovechamiento del contenido energético de la biomasa mediante diversos métodos de transformación [15]. Esta energía se origina de la radiación solar; a través del proceso de fotosíntesis las plantas captan y almacenan esta radiación, absorben agua del suelo y CO<sub>2</sub> de la atmósfera para finalmente liberar oxígeno [11, 85]. Posteriormente, los animales obtienen esta energía siguiendo las cadenas tróficas, por lo que sus residuos también pueden ser aprovechados como recurso energético [75].

#### 2.3.1. Procesos de conversión de la biomasa

Actualmente existen múltiples métodos para aprovechar la energía contenida en la biomasa. Estas técnicas implican reacciones químicas que se llevan a cabo mediante procesos físicos, biológicos y térmicos [86].

- ❖ **Métodos fisicoquímicos:** Las técnicas fisicoquímicas emplean condiciones específicas de presión, temperatura, entre otros mecanismos, con el fin de obtener diversos biocombustibles como el biocarbón, el bioaceite y el gas de síntesis. Entre estos métodos se incluyen la torrefacción, la transformación hidrotermal (licuefacción, gasificación y carbonización) y la extracción de fluidos supercríticos [86].
- ❖ **Métodos bioquímicos:** La conversión bioquímica emplea microorganismos para descomponer la biomasa y producir biocombustibles, tales como el biogás y el bioetanol, mediante los procesos de fermentación y digestión anaeróbica [86].
- ❖ **Métodos termoquímicos:** La ruta termoquímica se basa en el uso de calor para transformar la biomasa en energía útil [86]. A continuación, se detalla esta clasificación.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.3.1.1. Procesos termoquímicos

La conversión termoquímica de la biomasa consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica mediante procesos que involucran diversas condiciones de temperatura, presión, humedad, entre otros factores. Estas condiciones favorecen el desarrollo de reacciones químicas y permiten la obtención de diversos productos en estado sólido, líquido y gaseoso, además de la liberación de energía en forma de calor [87, 88].

En la Figura 2.2 se incluyen las principales técnicas termoquímicas para la conversión energética de la biomasa, los rangos de temperatura necesarios para su realización y los productos generados. Entre estos métodos se encuentran la pirólisis, la gasificación, la licuefacción y la combustión [87, 89].

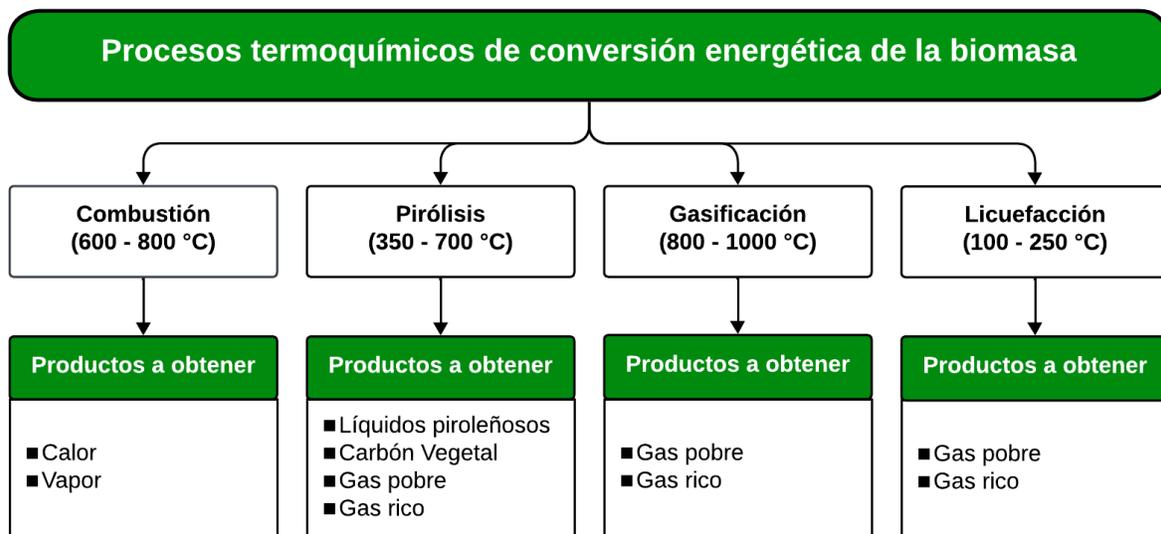


Fig. 2.2 — Métodos termoquímicos de transformación energética de la biomasa [87, 89].

La pirólisis es un proceso que convierte la materia orgánica en distintos tipos de biocombustibles mediante el calentamiento de la biomasa en ausencia de aire. Este método se clasifica en pirólisis lenta y rápida, en función de la velocidad de calentamiento. Por su parte, la gasificación emplea temperaturas muy elevadas (800-1000 °C) para generar gases combustibles mediante la regulación del suministro de aire u oxígeno en un ambiente controlado. En el caso de la licuefacción, usualmente se emplea un disolvente (como el agua, el etanol, la acetona y otros similares) a una temperatura relativamente baja, con el

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

fin de obtener principalmente bioaceite, biocarbón y productos gaseosos en menor medida [90]. Específicamente para este caso de estudio, se abordará con mayor detalle el proceso de combustión en el siguiente apartado.

### 2.3.1.1.1. Combustión

La combustión es la ruta termoquímica más utilizada para aprovechar la energía de la biomasa. Esta reacción tiene el objetivo de generar calor mediante la reacción química entre un carburante (reductor), un comburente (oxígeno) y una fuente de calor (energía de activación) [91]. Entre los productos obtenidos mediante la combustión directa se incluyen energía en forma de calor y un conjunto de compuestos gaseosos (humo y vapor de agua). La ecuación 3 describe la reacción de la combustión completa del carbono.



En la Figura 2.3 se observa el triángulo de fuego compuesto por los elementos participantes de la combustión previamente mencionados. Es importante señalar que la ausencia de la cantidad necesaria de comburente u oxidante reducirá la calidad del proceso, mientras que la falta de este impedirá que la combustión se lleve a cabo [73, 86, 90]. Otro factor muy importante que considerar es el contenido de humedad del combustible, ya que este parámetro debe ser inferior al 25 % en base húmeda para permitir el inicio del proceso [92]. Además, en el caso de la leña se necesita alcanzar una temperatura mínima de ignición entre los 300 y 400 °C.

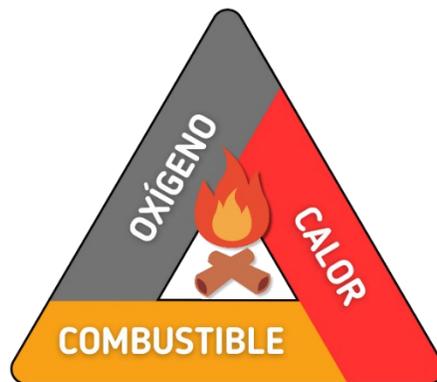


Fig. 2.3 — Triángulo de fuego.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.3.1.1.1. Combustible

Un combustible es cualquier material capaz de liberar energía (calor) al someterse a diversos procesos de conversión energética. Estos están compuestos fundamentalmente de carbono e hidrógeno, pero también pueden contener pequeñas cantidades de azufre, oxígeno e inertes tales como humedad, cenizas,  $N_2$  y  $CO_2$ . La mayoría de los combustibles, independientemente de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, presentan propiedades similares [93, 94].

### 2.3.1.1.2. Comburente

El comburente es una sustancia que permite la reacción química de oxidación del combustible originando la combustión. Para que esto se lleve a cabo estos elementos deben encontrarse en proporciones adecuadas a cierta temperatura de ignición [95]. El comburente más común es el oxígeno presente en el aire atmosférico en una proporción del 21 %; sin embargo, no es la única sustancia que puede actuar como oxidante. Por otro lado, para que una combustión pueda llevarse a cabo es necesaria una concentración mínima de oxígeno, entre un 10 % y un 15 % [94].

### 2.3.1.1.3. Energía de activación (calor)

La energía de activación es la energía mínima que necesita un sistema antes de poder iniciar un determinado proceso, como es el caso de la combustión. Por sí solos el combustible y el comburente no reaccionan, para esto es necesario un primer aporte de energía; la cantidad requerida dependerá de las características de combustible empleado [12, 94].

### 2.3.1.1.2. Fases de la combustión

El proceso de combustión consta de cuatro etapas o fases como el secado, la pirólisis, la oxidación completa y la combustión del material particulado [94].

- ❖ **Secado:** En esta fase, la temperatura del combustible supera los 100 °C, lo que ocasiona que el contenido de agua del combustible se evapore empleando parte de

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

la energía contenida en éste; estas pérdidas serán mayores o menores en función del contenido de humedad.

- ❖ **Pirólisis:** la segunda etapa se desarrolla entre los 200 y 500 °C, generando la liberación de diversos hidrocarburos en estado gaseoso, los cuales son liberados a la atmósfera en caso de que la combustión sea incompleta.
- ❖ **Oxidación completa:** durante la tercera etapa se produce una combustión de mayor calidad generando como productos CO<sub>2</sub>, agua, material particulado, entre otras sustancias.
- ❖ **Combustión del material particulado:** la última etapa se lleva a cabo entre los 600 y 800 °C; durante esta se queman las partículas liberadas en el aire, obteniéndose una combustión más eficiente con relación a la fase anterior.

### 2.3.1.1.3. Tipos de combustión

La calidad del proceso de combustión puede clasificarse en incompleta, completa y estequiométrica en función de la cantidad disponible de oxígeno y combustible. A continuación, se abordan estas categorías con más detalle [91].

#### 2.3.1.1.3.1. Combustión completa

Esta combustión se lleva a cabo cuando se dispone de la cantidad suficiente de comburente (comúnmente aire u oxígeno en dispositivos que utilizan biomasa como combustible) para oxidar el total del combustible disponible, lo que permite llevar a cabo un proceso eficiente que genera la máxima cantidad de energía posible, además de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Sin embargo, en la mayoría de los casos esto se realiza con una cantidad de comburente mayor a la necesaria, lo cual limita el calor útil ya que parte de la energía se pierde al calentar el exceso de comburente [91, 96, 97].

## **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.3.1.1.3.2. Combustión incompleta**

Esta combustión ocurre cuando se dispone de una cantidad de comburente inferior a la necesaria para oxidar todo el combustible disponible. Esto resulta en un proceso de baja eficiencia, que genera los mismos productos de la combustión completa, además de cenizas y altas concentraciones de contaminantes gaseosos, como el monóxido de carbono (CO) [91, 96, 97].

### **2.3.1.1.3.3. Combustión estequiométrica (perfecta)**

Esta combustión se produce con la cantidad exacta o estequiométrica de comburente para oxidar la totalidad del combustible disponible, lo cual permite maximizar la energía útil y minimizar la producción de contaminantes, generando los mismos productos que la combustión completa. Sin embargo, para que esto ocurra, es necesario determinar las proporciones adecuadas entre los reactivos mencionados ya que en condiciones reales, dicho proceso no puede llevarse a cabo de manera natural [91, 97].

De acuerdo con la bibliografía consultada la combustión en condiciones inadecuadas origina una gran variedad de productos contaminantes, estos gases y partículas impactan de manera negativa al contaminar el aire atmosférico, ocasionando problemas ambientales y deteriorando la salud humana. En el siguiente apartado, definiremos estos productos.

### **2.3.1.1.4. Productos generados durante la combustión de leña**

Los productos de la combustión de biomasa son gases y sustancias que pueden o no obtenerse en función del nivel de oxidación del combustible. Este proceso depende de múltiples factores como la disponibilidad del comburente, la temperatura, la composición y el contenido de humedad de la materia [91, 97-101].

A continuación, se describen los principales productos obtenidos en función de la calidad del proceso de combustión.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.3.1.1.4.1. Productos de la combustión completa

La combustión completa o eficiente se lleva a cabo en entornos con temperaturas elevadas (entre los 200 °C – 300 °C) y suficiente oxígeno para oxidar el combustible disponible. Este proceso genera múltiples productos entre los principales se incluyen [91, 97-101]:

- ❖ **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** El CO<sub>2</sub> es el principal producto de la combustión completa del carbono presente en la biomasa. Estas emisiones se consideran neutrales, ya que forman parte del ciclo del carbono para la fotosíntesis de las plantas.
- ❖ **Vapor de agua (H<sub>2</sub>O):** Otro de los compuestos generados durante la combustión completa de la biomasa es el agua en fase de vapor, este compuesto se forma cuando las moléculas de hidrogeno reaccionan con las de oxígeno presentes en el comburente.
- ❖ **Calor:** Es la energía liberada cuando los enlaces químicos que unen los compuestos que conforman la biomasa se rompen (carbohidratos, lignina, lípidos, entre otros), ocasionando una reacción exotérmica.

### 2.3.1.1.4.2. Productos de la combustión incompleta

La combustión incompleta es un proceso de baja eficiencia que tiene lugar comúnmente en ambientes con bajas temperaturas y/o con una cantidad de comburente inferior a la necesaria para oxidar el combustible disponible. Esta reacción genera diversos productos que tienen importantes implicaciones ambientales y de salud debido a su contribución a la contaminación del aire y el cambio climático, entre los compuestos principales se incluyen [98-100]:

- ❖ **Monóxido de carbono (CO):** El CO es el principal compuesto contaminante que se forma debido a una combustión incompleta del carbono presente en la biomasa. Este compuesto tiene efectos muy perjudiciales en la salud humana, produciendo diversos síntomas y enfermedades cuando se tiene un contacto prolongado.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- ❖ **Hidrocarburos no quemados (HC):** Los HC son contaminantes gaseosos compuestos principalmente de hidrógeno (H) y carbono (C). Estos incluyen diversos compuestos orgánicos volátiles (COV), como el etanal y el metanal, así como hidrocarburos alifáticos como el metano y el propano y aromáticos como el benceno y el tolueno.
  
- ❖ **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Los NO<sub>x</sub> son contaminantes que se generan comúnmente cuando el nitrógeno (N) y el oxígeno (O) presentes en el aire reaccionan a altas temperaturas. Entre estos se incluyen el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
  
- ❖ **Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>):** Los SO<sub>x</sub> son compuestos formados principalmente de azufre (S) y oxígeno (O). Estos se producen durante la oxidación de biomasa con altos contenido de azufre, como ciertas maderas o residuos agrícolas. Entre los principales compuestos generados se encuentran el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>).
  
- ❖ **Material Particulado (PM, Particulate Material por sus siglas en inglés):** El PM está compuesto por diminutas partículas sólidas y líquidas de diversas dimensiones, composiciones y orígenes que se encuentran en el aire. Estas partículas se clasifican principalmente en función del tamaño en PM<sub>10</sub> (material particulado grueso con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros), PM<sub>2.5</sub> (material particulado fino con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros) y UFP (partículas ultrafinas, PM ≤ 0.1 micrómetros de diámetro).
  
- ❖ **Cenizas:** Las cenizas son el residuo sólido generado al finalizar la combustión de la materia orgánica, las cuales están constituidas por diversos minerales no combustibles como el calcio, magnesio, potasio, fósforo, entre otros.

### 2.3.1.1.5. Efectos de la contaminación del aire en interiores

La contaminación de espacios cerrados por la combustión de biomasa puede tener graves efectos en la salud de las personas. Los principales compuestos generados durante la combustión incompleta ocasionan diversas enfermedades respiratorias y

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

cardiovasculares, e incluso problemas más severos, como el cáncer. Los gases tóxicos como el CO, PM, COV y SO<sub>2</sub> pueden agravar o aumentar el riesgo de infecciones respiratorias y desencadenar afecciones como el asma, la bronquitis y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) [99, 102, 103].

La exposición a contaminantes como el CO reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que puede provocar síntomas de intoxicación como dolor de cabeza, mareos, confusión, náuseas y en concentraciones muy elevadas, pérdida de conciencia e incluso la muerte. Algunos estudios sugieren que la exposición al CO y a los COV puede tener efectos negativos en el sistema nervioso, afectando la función cognitiva y el comportamiento, especialmente en adultos mayores e infantes. Otros compuestos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), incrementan el riesgo de desarrollar cáncer en distintos órganos como los pulmones [99, 102, 103].

### **2.3.1.1.6. Combustión en etapas múltiples**

Este proceso se lleva a cabo utilizando diversos sistemas que utilizan biomasa como combustible, como estufas, calderas, motores de combustión interna, entre otros. Estos dispositivos permiten llevar a cabo una serie de combustiones con el objetivo de lograr la oxidación completa del combustible disponible. Como parte del proceso, es fundamental suministrar la cantidad adecuada de comburente (aire u oxígeno) en diferentes zonas de la cámara de combustión, lo que permitirá incrementar la eficiencia final de la reacción y minimizar la producción de contaminantes [104-107].

#### **2.3.1.1.6.1. Combustión primaria**

Este proceso tiene lugar cuando el combustible se mezcla con un suministro inicial de comburente denominado aire u oxígeno primario el cual se introduce directamente en la zona de la biomasa para alcanzar su ignición, tal como se muestra en la Figura 2.4. Durante esta reacción química, se produce una combustión incompleta debido a la insuficiencia del oxidante en el entorno, lo que provoca la liberación de diversos compuestos parcialmente oxidados, como el CO [96, 104, 105].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

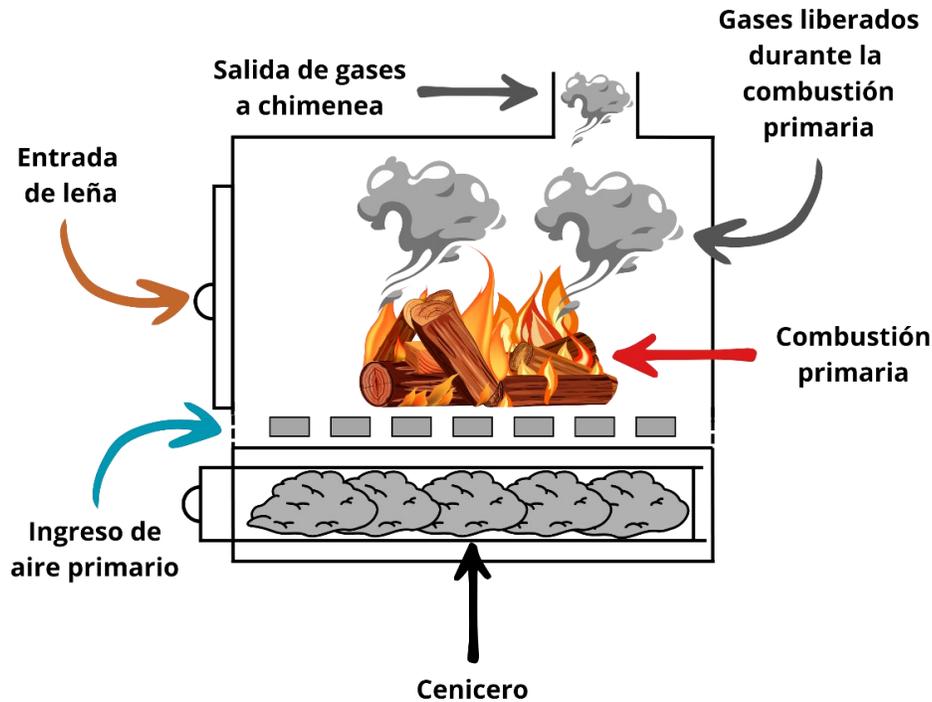


Fig. 2.4 — Sistema de combustión primaria [108].

### 2.3.1.1.6.2. Combustión secundaria o doble combustión (sistemas mejorados)

Este proceso se lleva a cabo cuando los productos parcialmente oxidados de la combustión primaria como el CO, los NO<sub>x</sub> y otros hidrocarburos, se mezclan con un suministro adicional de comburente denominado aire u oxígeno secundario. Este se introduce por encima del combustible con el objetivo de continuar la oxidación de los contaminantes mencionados, lo que libera una mayor cantidad de energía y permite lograr una combustión más completa y eficiente [96, 104, 105]. En la Figura 2.5 se observa el esquema de un sistema que funciona con biomasa e incorpora la doble combustión.

Este proceso es esencial en tecnologías de cocción mejoradas y sistemas de combustión avanzados, ya que permite optimizar el aprovechamiento del combustible y minimizar los impactos ambientales [96, 104, 105].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

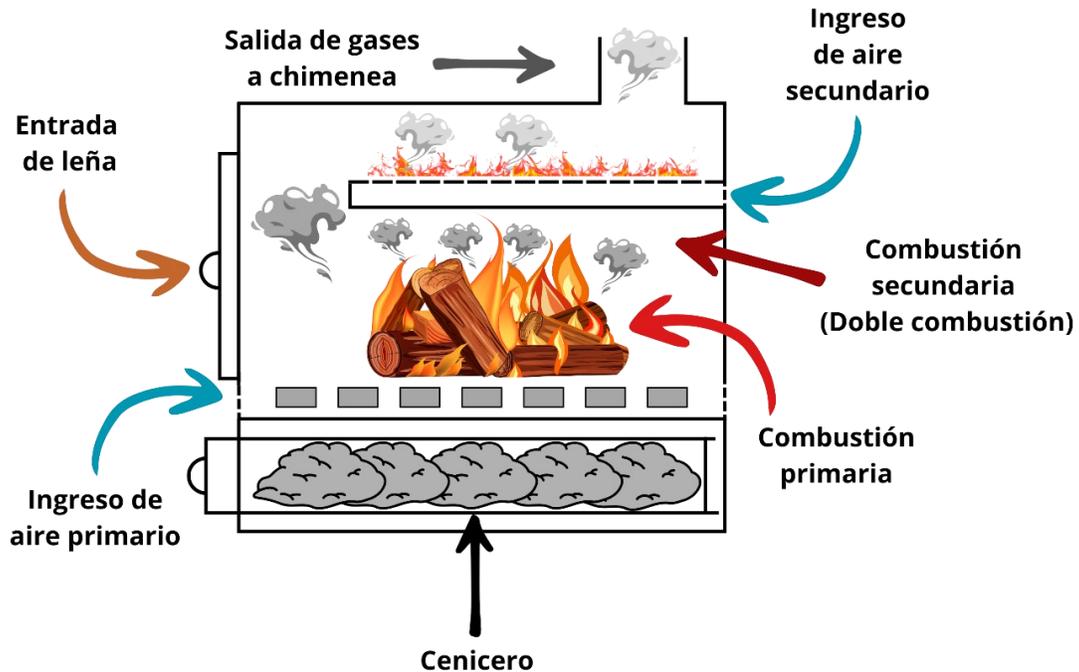


Fig. 2.5 — Sistema de combustión secundaria o doble combustión [108].

### 2.3.1.1.6.3. Combustión terciaria o triple combustión (sistemas avanzados)

Este proceso se efectúa cuando los productos que no fueron completamente oxidados en las fases anteriores, como los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el material particulado ultrafino (UFP, por sus siglas en inglés), se someten a una tercera combustión. Esto se logra al introducir un tercer suministro de aire u oxígeno terciario en una zona específicamente diseñada para completar la reacción química tal como se observa en la Figura 2.6. Para ello, es necesario controlar diversos parámetros en el sistema como la temperatura y el tiempo de residencia de los gases, con el objetivo de garantizar la conversión completa de los contaminantes restantes en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) [106, 107, 109, 110].

La combustión terciaria es común en sistemas avanzados, como calderas industriales y estufas de alta eficiencia, donde es esencial maximizar la eficiencia de la reacción de oxidación y minimizar las emisiones de contaminantes al medio ambiente [106, 107, 109, 110].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

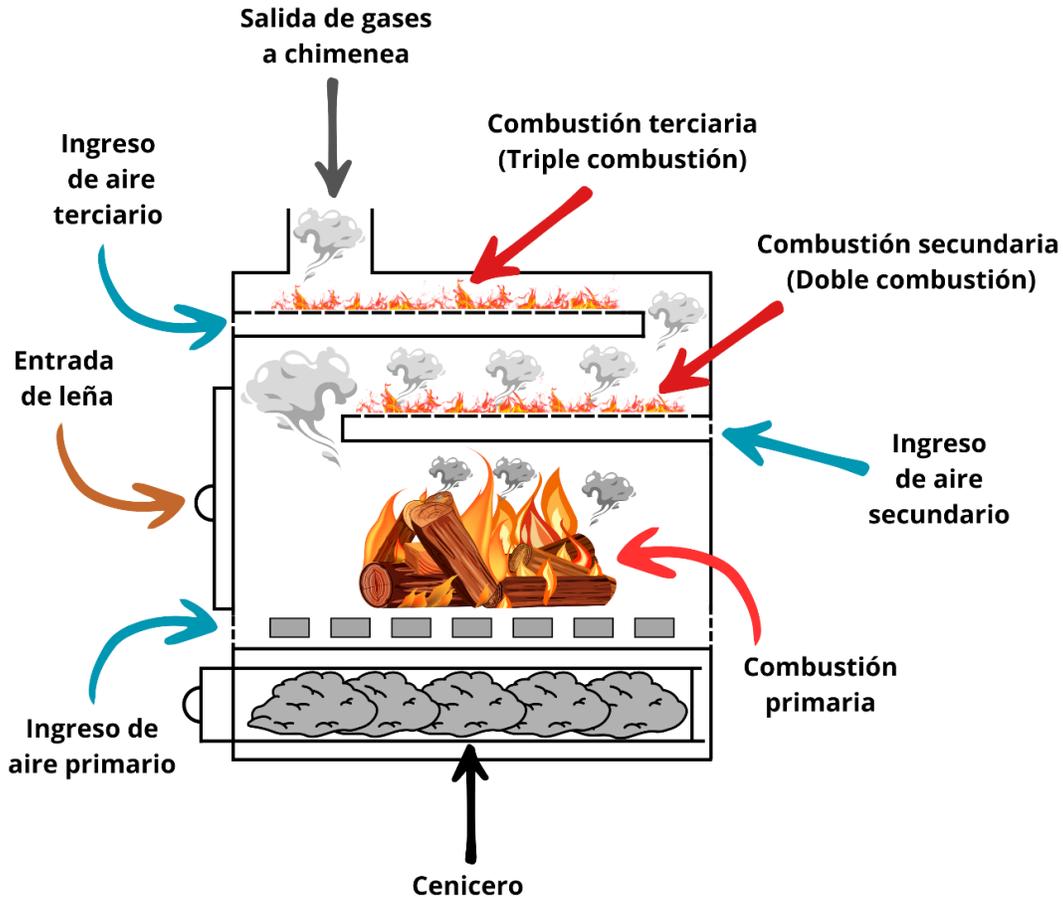


Fig. 2.6 — Sistema de combustión terciaria o triple combustión [108].

### 2.4. Tecnologías de estufas mejoradas para cocción con leña

Las estufas ecológicas son una alternativa a las tecnologías tradicionales que utilizan biomasa como combustible. Estos dispositivos están diseñados con el objetivo de ser accesibles y sostenibles al mismo tiempo que buscan minimizar la exposición de los usuarios a las emisiones nocivas generadas durante la combustión, mitigar la producción de humo y gases contaminantes, optimizar el consumo de combustible y el uso eficiente de la energía térmica. Además, buscan aumentar la seguridad del usuario durante la operación y reducir el impacto ambiental asociado al uso de modelos tradicionales. A su vez, estos beneficios contribuyen a mejorar la calidad de vida de los usuarios, al reducir el consumo de combustible, minimizar la incidencia de enfermedades asociadas con la exposición al calor y los contaminantes generados durante la combustión [111, 112].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En las últimas décadas, diversas tecnologías de estufas ecológicas se han implementado a nivel nacional y estatal, destacándose los modelos descritos a continuación.

### 2.4.1. Modelos principales implementados en México

En México, la implementación de estufas ecológicas ha sido una estrategia para mitigar la incidencia de enfermedades ocasionada por la exposición a los contaminantes generados durante la combustión, al mismo tiempo que se contribuye a la sostenibilidad ambiental, especialmente en las comunidades rurales [1, 2]. A continuación, se presentan algunos de los principales modelos de estufas ecológicas implementados en distintas zonas del país:

#### 2.4.1.1. Lorena

La estufa ecológica Lorena es un dispositivo diseñado para la cocción de alimentos. Su estructura consiste en una cámara de combustión fija, elaborada principalmente con barro, arena, ladrillos y cemento. Esta incorpora conductos internos que brindan soporte al combustible y redirigen los gases generados durante su uso. Paralelamente, se incorporan múltiples comales de metal con diferentes dimensiones en la parte exterior y una chimenea que expulsa el humo de la cocina. La estructura mencionada se construye sobre una base de adobe, ladrillos o concreto y cuenta con una chimenea que expulsa el humo fuera de la cocina tal como puede apreciarse en la Figura 2.7 [4, 113].



Fig. 2.7 — Estufa ecológica Lorena [113].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.4.1.2. Patsari

La estufa ecológica Patsari es una tecnología desarrollada en México. Su diseño está inspirado en la estufa Lorena; sin embargo, presenta algunas diferencias con respecto al modelo mencionado como son la forma y posición de los espacios internos de la cámara de combustión, así como la sustitución de materiales como la madera, el barro y la arena por materiales metálicos tanto en la estructura interna como en la externa. Otros materiales integrados incluyen ladrillos refractarios, barro, arena y cemento. La Figura 2.8 muestra la apariencia exterior de este dispositivo. Al igual que el modelo anterior, incluye una chimenea para expulsar las emisiones contaminantes [6].



Fig. 2.8 — Estufa ecológica Patsari [6].

### 2.4.1.3. Túumben K'óoben

La estufa ecológica Túumben K'óoben es un modelo diseñado por la organización civil U'yo'olché A. C. para su implementación en comunidades rurales de la península de Yucatán. Este dispositivo está conformado por una cámara de combustión cerrada como puede apreciarse en la Figura 2.9. Esta tecnología fue fabricada con materiales como ladrillos refractarios, arena y cemento, y ha sido diseñada con el objetivo de maximizar la eficiencia térmica y reducir el consumo de combustible. Además, incorpora una chimenea que expulsa el humo fuera de la vivienda, minimizando la exposición a contaminantes al interior de la cocina [23, 114].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS



Fig. 2.9 — Estufa ecológica Túumben K'óoben [114].

### 2.4.1.4. Onil

La estufa ecológica Onil es un modelo diseñado por la organización guatemalteca HELPS International con el objetivo de reducir el uso de combustible, minimizar las emisiones de gases nocivos dentro de las viviendas y mitigar el impacto ambiental derivado de la deforestación. Este modelo incluye una cámara de combustión construida con materiales refractarios, los cuales optimizan la generación y retención de calor tal como puede observarse en la Figura 2.10. Además, incorpora una chimenea que expulsa el humo hacia el exterior, mejorando la calidad del aire dentro de las viviendas. La base de la estufa se construye con concreto o bloques resistentes, los cuales proporcionan estabilidad y durabilidad [6, 115].



Fig. 2.10 — Estufa ecológica Onil [6].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.4.1.5. Rocket

La estufa ecológica Rocket es un dispositivo diseñado para optimizar el consumo de combustible y minimizar las emisiones contaminantes. Algunas variantes de este modelo se presentan en la Figura 2.11. Estas incorporan una cámara de combustión estrecha fabricada con materiales diversos como ladrillos refractarios, acero o barro, con ventilación suficiente para lograr una combustión más completa y eficiente. Además, cuenta con una chimenea interna aislada térmicamente que mejora la circulación del aire y concentra el calor directamente en los utensilios de cocina [116].



Fig. 2.11 — Estufas ecológicas Rocket de acero [116].

### 2.4.2. Modelos principales implementados en Chiapas

En el sureste de México se han implementado diversas tecnologías mejoradas para la cocción de alimentos con leña, entre los principales modelos implementados en Chiapas destacan la Lorena, Patsari, Onil y CETA. Otros modelos destacables son “Lekil Vaj” y “Enerchía” [3, 24, 63, 117].

#### 2.4.2.1. CETA

Este modelo fue desarrollado por el Centro de Experimentación en Tecnología Apropiada (CETA) de Guatemala. La cámara de combustión posee una forma rectangular, que se elabora utilizando materiales como ladrillos de arcilla, clavos, madera, cemento, estiércol y sal. Esta estructura incorpora una entrada rectangular y un tope que impide que el combustible alcance el extremo opuesto a la entrada, con el objetivo de distribuir de manera más eficiente el calor. Paralelamente, la plancha de este dispositivo se fabrica

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

utilizando una mezcla de tierra, agua, sal y estiércol, que incorpora varios accesos circulares que permiten el contacto directo entre el fuego y los recipientes utilizados, así como el acoplamiento de la chimenea. En la Figura 2.12 se observa este modelo en operación durante la cocción de alimentos [3].

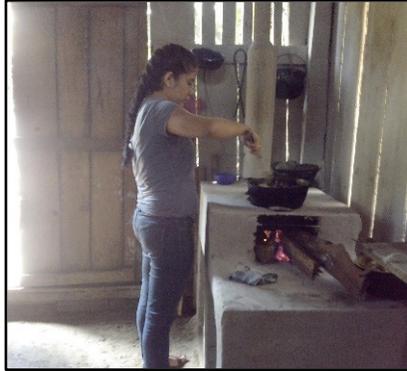


Fig. 2.12 — Estufa ecológica CETA [117].

### 2.4.2.2. Lekil Vaj

Este dispositivo fue desarrollado por investigadores de la Universidad del Valle de México (UVM) y la UNICACH con el objetivo de mejorar la calidad de vida en comunidades rurales. La cámara de combustión de este modelo tiene forma circular, la cual está compuesta por tablillas de madera, una estructura interna de soporte metálica y una pared aislante interior hecha de arcilla y barro. El diseño incluye una entrada lateral para el combustible, un comal de hierro y una chimenea ubicada en la parte superior tal como puede apreciarse en la Figura 2.13 [63].



Fig. 2.13 — Estufa ecológica Lekil Vaj [63].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.4.2.3. Enerchía

Este dispositivo fue desarrollado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER), actualmente denominado Instituto de Investigaciones en Energías Renovables (IIER) de la UNICACH como una alternativa eficiente para la cocción de alimentos de manera segura en comunidades rurales. La cámara de combustión tiene una forma rectangular y está fabricada con cemento y madera. Incorpora un comal de hierro y una chimenea de acero acoplada a uno de los costados laterales tal como puede observarse en la Figura 2.14 [24].



Fig. 2.14 — Estufa ecológica Enerchía [24].

### 2.4.3. Estufa ecológica “Vilma”

La estufa ecológica Vilma es un dispositivo diseñado para la cocción de alimentos considerando las necesidades y preferencias de los usuarios del sureste de México. Este modelo cuenta con una cámara de combustión cerrada con entradas para aire primario y secundario, lo que permite lograr un proceso de oxidación más eficiente. Además, incorpora una chimenea que expulsa las emisiones contaminantes al exterior de la cocina, mejorando la calidad del aire en interiores. La base de la estufa se construye utilizando diversos materiales locales de la zona de implementación, como bloques de cemento, tablonces de madera y ladrillos. En la Figura 2.15 se muestra un modelo 3D del modelo mencionado.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

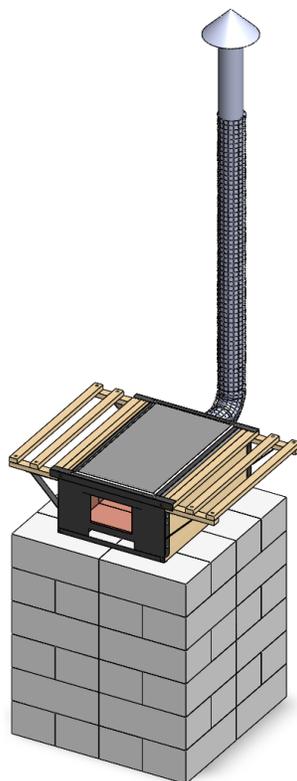


Fig. 2.15 — Modelo 3D de la estufa ecológica Vilma [No. de solicitud de patente MX/a/2023/000596].

El diseño de la estufa Vilma combina componentes térmicos, ligeros y duraderos, como láminas de metal, tablas, fibra cerámica, ladrillos y petatillos de arcilla. Estos materiales permiten al dispositivo ahorrar combustible, almacenar el calor generado durante intervalos prolongados, alcanzar temperaturas elevadas en breves periodos y minimizar los tiempos de cocción. Además, este modelo incorpora un comal con espacio para más de un recipiente, lo que permite a los usuarios cocinar cómodamente varios alimentos de manera simultánea. Del mismo modo, cuenta con paredes y soportes de madera laterales, que aumentan la seguridad durante el uso y permiten sostener los recipientes y utensilios empleados durante la cocción.

### 2.5. Protocolos para la evaluación de estufas ecológicas

En la actualidad existen diversos estándares internacionales y locales para la evaluación de los dispositivos de cocción con leña. Estos procedimientos tienen el objetivo

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

de medir el desempeño de las tecnologías, mediante la recopilación de datos que puedan emplearse para el desarrollo de nuevos modelos y la optimización de los ya existentes. Otra utilidad de esta información es que permite medir la evolución de las estufas, comparando los resultados de distintos aparatos. De acuerdo con el área de aplicación, estas metodologías pueden clasificarse en protocolos de laboratorio y de campo, para los fines de este estudio se abordan las siguientes clasificaciones [70].

### 2.5.1. Evaluación en laboratorio

Los estándares de laboratorio están diseñados para su implementación en entornos controlados. Estos procedimientos evalúan diversos parámetros y características entre las que se incluyen la eficiencia térmica, el consumo de combustible, el tiempo de ebullición del agua, las emisiones contaminantes, la seguridad y la calidad de los materiales. Entre estas metodologías se encuentran la prueba de ebullición del agua (WBT), el protocolo de seguridad, la prueba de durabilidad y otras similares. Las primeras versiones fueron desarrolladas a principios de la década de los 80. En los años recientes, se han publicado nuevas versiones por la Alianza para la Cocina Limpia y colaboradores [70].

### 2.5.2. Evaluación en campo

Los procedimientos de campo tienen la finalidad de medir el desempeño de los dispositivos implementados en interacción con la variabilidad de un entorno real de operación. Estos factores incluyen las prácticas o costumbres de los usuarios, los cambios estacionales, los tipos de combustible empleados y otros similares. Los parámetros evaluados durante estas pruebas incluyen el consumo diario y la humedad del combustible, la masa de alimentos cocinados, el tiempo de cocción, entre otros. En el caso de esta clasificación se encuentran el protocolo de cocción controlada y la prueba de funcionamiento en cocina, específicamente para el caso de este trabajo, se aborda este último procedimiento en la siguiente sección [70, 118].

#### 2.5.2.1. Prueba de funcionamiento en cocina (KPT versión 3.0)

La prueba de funcionamiento en cocina está diseñada para evaluar el impacto de la implementación de nuevos modelos de estufas de leña en el consumo de combustible; este

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

procedimiento consiste en realizar un estudio cuantitativo y cualitativo sobre los dispositivos mencionados, a través de la medición diaria de la humedad de la leña y la cantidad diaria empleada durante un período determinado (3-7 días), así como la aplicación de encuestas que permitan contextualizar al investigador sobre prácticas de cocción, especies combustibles preferidas, frecuencia de usos, ventajas y desventajas en relación a otros dispositivos [49, 50]. Las versiones más recientes de KPT se pueden utilizar para diversos tipos de estudios, entre los que se engloban:

- ❖ Demostrar las diferencias en el consumo de combustible entre hogares que utilizan tecnologías tradicionales y aquellos que emplean tecnologías mejoradas.
- ❖ Evaluar las diferencias en el consumo de combustible entre hogares que utilizan estufas similares pero diferentes tipos de combustible.
- ❖ Demostrar los nuevos patrones generados en el consumo de combustible por los nuevos modelos implementados.
- ❖ Medir las variaciones en el consumo de combustible resultantes de cambios estacionales, la disponibilidad de combustible o los ciclos agroeconómicos locales.

Para comparar el desempeño de dos o más tecnologías, la prueba se puede realizar de dos maneras.

- ❖ **Estudio pareado.** Consiste en realizar evaluaciones diarias empleando exclusivamente una tecnología durante un lapso determinado y posteriormente replicar el proceso utilizando una tecnología diferente.
- ❖ **Estudio transversal.** Consiste en evaluar el uso de una tecnología tradicional y otra mejorada en dos hogares simultáneamente.

### 2.5.2.2. Prueba de emisiones intramuros (PEI versión 1.0)

La prueba de emisiones intramuros es un protocolo local diseñado en el IIIER-UNICACH para evaluar la calidad del aire en espacios interiores, a través de la medición de las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub> generadas durante la combustión de leña y la aplicación de estándares establecidos por diversos organismos internacionales (OMS, EPA y REHVA). Es importante mencionar que dicha metodología está basada en la norma boliviana NB 83001 y puede implementarse en entornos de laboratorio y campo [119].

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.6. Evaluación financiera de proyectos de inversión

La evaluación financiera es el proceso en el que se analiza la viabilidad económica de un proyecto, considerando tanto los riesgos como las ganancias potenciales asociadas. Para llevar esto a cabo, es fundamental comprender ciertos conceptos de la economía, como la inversión, el flujo efectivo y los diferentes criterios aplicables para la evaluación financiera [120, 121].

#### 2.6.1. Inversión

La inversión se define como los recursos materiales y financieros destinados para su aprovechamiento en actividades económicas con el propósito de obtener un beneficio futuro. Estas actividades incluyen la construcción de instalaciones, la adquisición de terrenos, maquinarias, instrumentación, materias primas, mobiliario y el desarrollo de programas y métodos para la producción de los bienes o servicios, los cursos de capacitación del personal, entre otros [120]. La viabilidad de una inversión se define por cuatro indicadores, como son: rentabilidad, riesgo asumido, plazos y liquidez [121, 122].

#### 2.6.2. Flujo de efectivo

El flujo de efectivo (FE), o flujo de caja (FC), se define como los ingresos y egresos de recursos financieros destinados a actividades económicas generalmente clasificadas en operativas, de inversión y de financiamiento, de un negocio, empresa o proyecto durante un período específico. Esta información es de gran importancia para las organizaciones con fines lucrativos, ya que permite evaluar la sostenibilidad financiera, la liquidez, la capacidad operativa y otros parámetros económicos [120]. El FE puede calcularse empleando la ecuación 4.

$$FE = \text{Ingresos totales de efectivo} - \text{Egresos totales de efectivo} \quad \text{Ec. 4}$$

Existen múltiples criterios para clasificar el cálculo del FE. Entre los principales se encuentran el contexto de análisis (personal o empresarial), las actividades de la empresa, el objetivo financiero, el período de evaluación y el resultado neto. Específicamente, esta última categoría se subdivide en flujo de efectivo bruto (FEB) y flujo de efectivo neto (FEN).

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La interpretación del resultado al determinar el FE dependerá de los siguientes casos:

**Valor positivo:** Indica que las ganancias superan a los gastos, lo que puede ser una señal de buena salud financiera. Un valor positivo resulta favorable, ya que permite el pago de deudas, mantener la operación del negocio y reinvertir.

**Valor negativo:** Indica que los gastos superan las ganancias, aunque también puede reflejar inversiones estratégicas que pueden ser benéficas a largo plazo.

### 2.6.3. Tasa de descuento o de rendimiento mínimo aceptable

La tasa de descuento ( $i$ ) es un porcentaje utilizado en los análisis financieros para calcular el valor presente o actual de los flujos de efectivo futuros de un proyecto, negocio o inversión. Este valor también puede representar el interés o el costo de utilizar un financiamiento externo, o el rendimiento mínimo que los inversionistas esperan obtener al destinar sus recursos a una actividad económica [123, 124].

### 2.6.4. Valor presente neto

El Valor Presente Neto (VPN) es una de las medidas financieras utilizadas para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión mediante el cálculo de su rentabilidad durante un período determinado. Esta herramienta permite determinar las posibles ganancias o pérdidas que puede generar la actividad económica a partir del valor presente de los flujos de efectivo proyectados. El valor del VPN puede calcularse utilizando la ecuación 5, la cual considera la inversión inicial, la tasa de descuento y los ingresos y egresos proyectados a lo largo de un intervalo de tiempo específico [120, 121].

$$VPN = -I + \frac{FE_1}{(1+i)^1} + \frac{FE_2}{(1+i)^2} + \frac{FE_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FE_n}{(1+i)^n} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$I$  = Inversión inicial (MXN y afines)

$FE_n$  = Flujo de efectivo en cada año de operación (MXN y afines)

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

$i$  = Tasa de descuento (%)

$n$  = Período de análisis (años y afines)

La interpretación del resultado al calcular el VPN dependerá de los siguientes casos:

1.  $VPN > 0$ : Si el VPN es positivo, significa que el proyecto generará un rendimiento superior al mínimo requerido (la tasa de descuento), por lo que la inversión es rentable, ya que el valor actual de los ingresos supera el costo de la inversión.
2.  $VPN = 0$ : Si el VPN es igual a cero, significa que el proyecto no genera ni pérdidas ni ganancias netas, es decir, cubre el costo del capital invertido, pero no crea valor adicional.
3.  $VPN < 0$ : Si el VPN es negativo, significa que los ingresos futuros no cubren la inversión inicial y los costos del proyecto, lo que indica que la inversión no es rentable y debería ser descartada.

### 2.6.5. Tasa interna de retorno

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es una de las medidas financieras utilizadas para evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión, calculando la tasa de rendimiento que este puede generar en un período específico. El valor de la TIR puede obtenerse utilizando la ecuación 6, la cual considera la inversión inicial, así como el flujo de efectivo proyectado en el tiempo [120, 121].

$$0 = -I + \frac{FE_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{FE_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1 + TIR)^n} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$I$  = Inversión inicial (MXN y afines)

$FE_n$  = Flujo de efectivo en cada año de operación (MXN y afines)

$n$  = Período de análisis (años y afines)

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La interpretación del resultado al determinar la TIR dependerá de los siguientes casos:

1.  $TIR > i$  : Si la TIR es mayor que la tasa de descuento o el porcentaje de rendimiento mínimo aceptable, el proyecto producirá ganancias, por lo que es rentable y debería ser aceptado.
2.  $TIR = i$  : Si la TIR es igual a la tasa de descuento, el proyecto es indiferente, ya que su VPN es igual a cero. Esto significa que la actividad operativa cubriría el monto invertido, pero no generaría ganancias adicionales.
3.  $TIR < i$  : Si la TIR es menor que la tasa de descuento, el proyecto no es rentable, ya que el VPN será negativo. Esto indica que la actividad operativa generará pérdidas financieras, por lo que debería ser rechazado.

### 2.6.6. Relación costo-beneficio

La relación costo-beneficio (C/B) es una medida utilizada para evaluar la viabilidad de una inversión, comparando los costos con los beneficios esperados. Esta relación permite determinar si las utilidades justifican los gastos involucrados, facilitando una toma de decisiones más eficiente. El valor de la C/B puede obtenerse utilizando la ecuación 7, que considera los flujos de efectivo, la tasa de descuento y la inversión realizada [120].

$$C/B = \frac{\frac{FE_1}{(1+i)^1} + \frac{FE_2}{(1+i)^2} + \frac{FE_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FE_n}{(1+i)^n}}{I} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$FE_n$  = Flujo de efectivo en cada año de operación (MXN y afines)

$n$  = Período de análisis (años y afines)

$i$  = Tasa de descuento (%)

$I$  = Inversión inicial (MXN y afines)

La interpretación del resultado al determinar la C/B dependerá de los siguientes casos:

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.  $C/B > 1$  : Si la relación es mayor que 1, indica que los beneficios superan los costos, lo cual es favorable desde una perspectiva económica.
2.  $C/B < 1$  : Si la relación es menor que 1, los costos superan a los beneficios, lo que sugiere que la inversión no es rentable y no debería llevarse a cabo.
3.  $C/B = 1$  : Si la relación es igual a 1, los costos y los beneficios se equilibran, y la inversión no genera beneficios económicos.

### 2.6.7. Período de recuperación de la inversión

El período de recuperación de la inversión (PRI), es una técnica financiera para estimar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de un proyecto a partir de sus flujos netos de efectivo. Es importante considerar que este método no considera los flujos de caja posteriores al intervalo de recuperación ni los cambios en el valor del dinero en función del tiempo, por lo que se recomienda recuperar la inversión en el menor tiempo posible. La duración óptima de recuperación depende de varios factores, como la vida útil, las condiciones del mercado, las expectativas del inversionista, la TIR y el VPN [121]. El valor del PRI puede obtenerse utilizando la ecuación 8.

$$PRI = n - 1 + \frac{(F_{AC})(n - 1)}{F(n)} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$n$  = Período final con saldo negativo (años y afines)

$F_{AC}$

= Flujo de efectivo acumulado en el último período con saldo negativo (MXN y afines)

$F(n)$  = Flujo acumulado del primer período con saldo positivo (MXN y afines)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En esta sección se describe la metodología utilizada para evaluar, en condiciones reales de operación, el consumo de combustible, las emisiones intramuros, el impacto económico y el desarrollo de un manual de usuario para una estufa ecológica Vilma implementada en la comunidad de San Francisco del Mar, Oaxaca. En la Figura 3.1 se incluye un esquema del proceso metodológico seguido en este trabajo de investigación.

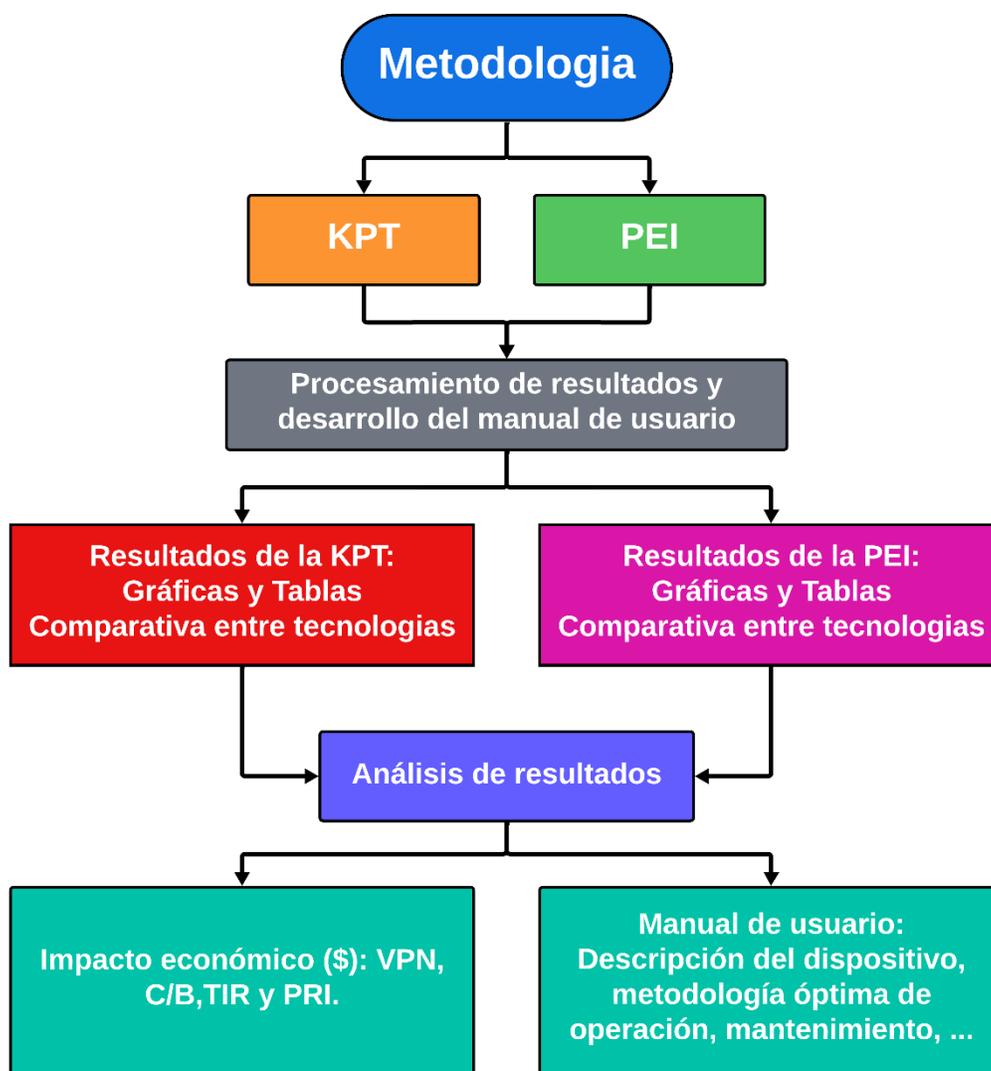


Fig. 3.1 — Metodología de evaluación implementada.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

Para ello, inicialmente se siguió lo estipulado en el Protocolo de Funcionamiento en Cocina (KPT), versión 3.0, y en la prueba de emisiones intramuros (PEI), versión 1.0<sup>3</sup>. Asimismo, se adaptó la metodología empleada por Zavala López y Orozco Meza para el análisis del impacto económico asociado al uso del modelo implementado [121]. Finalmente, se elaboró un manual de usuario que contempla los resultados de las pruebas realizadas, así como la información sobre la estructura, el procedimiento de instalación, operación y mantenimiento, y las normas para su uso en un entorno doméstico.

### 3.2. Prueba de funcionamiento en cocina (KPT versión 3.0)

El Protocolo de Funcionamiento en Cocina (KPT), versión 3.0, está diseñado para evaluar aspectos cualitativos y cuantitativos de las tecnologías de cocción implementadas en campo. Para tal fin, la metodología de la KPT se encuentra dividida en dos fases. La primera de ellas consiste en llevar a cabo un estudio cualitativo del manejo de los combustibles y el uso de los dispositivos de cocción, mediante la aplicación de encuestas a los usuarios. Por otra parte, la segunda etapa implica la evaluación del consumo de los combustibles utilizados, mediante mediciones del total empleado diariamente durante un período determinado. A continuación, se describe el procedimiento seguido durante el desarrollo de este trabajo de investigación al implementar la KPT.

#### 3.2.1. Evaluación cualitativa

El estudio cualitativo del patrón de uso de los combustibles y las tecnologías de cocción se realizó aplicando los cuestionarios establecidos en la KPT, versión 3.0. Dicho lo anterior, esto se llevó a cabo en el siguiente orden:

1. Encuesta previa (KPT): Se aplicó con el objetivo de reunir información económica, social y cultural sobre el entorno de evaluación antes de la implementación de la estufa ecológica “Vilma”. Este cuestionario incluyó preguntas sobre la cantidad, edad y sexo de los habitantes de la vivienda, así como las actividades realizadas, las características de una o varias cocinas, el estado y la frecuencia de uso de las

---

<sup>3</sup> El procedimiento en extenso de los estándares mencionados se incluye en los anexos A y B.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

tecnologías de cocción, las prácticas y costumbres relacionadas con la preparación de alimentos, los procedimientos de mantenimiento de los dispositivos, la frecuencia de dicho mantenimiento, así como las ventajas, desventajas y problemáticas a percibidas por el usuario respecto a cada modelo.

Por otro lado, también se recopilaron datos sobre las características de los combustibles empleados, su procedencia, los costos asociados a su adquisición, y el consumo estimado semanal y mensual. Del mismo modo, se registraron las características de los recipientes utilizados y el nombre de la persona responsable de cocinar en el hogar. Esta encuesta se incluyó en el anexo A.

2. Encuesta de seguimiento (KPT): Se aplicó posteriormente a la implementación de la estufa ecológica Vilma, con el fin de obtener información sobre el impacto de la tecnología mejorada en el uso y el consumo de los combustibles empleados, así como sobre posibles cambios en la situación económica y social de la familia evaluada, en comparación con los resultados obtenidos en la encuesta previa.

Al igual que el cuestionario anterior, la encuesta de seguimiento incluyó preguntas sobre la situación demográfica de los habitantes (cantidad, sexo y edad), las tecnologías de cocción utilizadas (uso diario, estado actual, ventajas, desventajas, problemáticas y mantenimiento), así como las características de los recipientes y la frecuencia de uso de combustibles. Esta encuesta también se encuentra en el anexo A.

Una vez concluida la etapa cualitativa, se continuó con las pruebas cuantitativas en la estufa ecológica Vilma y el fogón tradicional, las cuales se describen en el siguiente apartado.

### **3.2.2. Evaluación cuantitativa**

La evaluación cuantitativa se realizó siguiendo el procedimiento establecido en el protocolo KPT, versión 3.0, cuyo objetivo es determinar el consumo diario de combustible al utilizar los dispositivos de cocción durante un período determinado. A igual que en la sección cualitativa, esto se llevó a cabo con el fin de comparar los resultados obtenidos

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

entre las tecnologías [49, 67]. En este trabajo se utilizó un enfoque de muestra pareada, este consistió en ejecutar evaluaciones diarias durante un período de siete días utilizando el dispositivo tradicional. Posteriormente, se repitió el mismo procedimiento empleando la estufa ecológica Vilma a lo largo del mismo período. Finalmente, los datos recopilados fueron ingresados en la hoja de cálculo correspondiente al protocolo KPT para su posterior análisis.

### **Etapas previas a la evaluación**

Previo al desarrollo de las pruebas cuantitativas, se establecieron las condiciones de trabajo y se realizaron adecuaciones en el área de evaluación. Para ello, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Reunión con los usuarios de la tecnología implementada.
  - 1.1. Se realizó una plática con los habitantes del hogar, en la que se acordaron los horarios de prueba, se establecieron las condiciones en las que se llevaron a cabo las evaluaciones y se explicó a los usuarios el procedimiento a seguir, remarcando que se debían mantener sus prácticas cotidianas de cocción y uso de los dispositivos.
  - 1.2. Se solicitó a los usuarios seleccionar un área para el almacenamiento del combustible, y se indicó que durante las pruebas, solo debía utilizarse la leña dispuesta en dicha zona.
2. Se pesó la leña disponible para las tareas de cocinado y se almacenó en el área previamente seleccionada por los usuarios.
3. Se organizó el espacio donde se colocaron los equipos, herramientas y utensilios necesarios para la realización de las pruebas.
4. Por último, se iniciaron las evaluaciones con la estufa ecológica de doble combustión Vilma y el fogón tradicional.

### Etapa de evaluación

1. Se midió y registró el contenido de humedad de los extremos y el centro de al menos tres trozos de leña, utilizando un medidor de humedad y temperatura (Moisture Meter Mestek — MW700).
2. Se midió y registró la masa de los ingredientes empleados en cada receta, utilizando una báscula electrónica (Torrey — LEQ 10).
3. Al finalizar las actividades de cocción, se calculó el consumo total de combustible mediante la diferencia entre la cantidad inicial y final de leña almacenada. Para ello, se empleó la misma báscula electrónica mencionada.
4. Se registraron el sexo y la edad de cada persona que consumió los alimentos preparados, utilizando los formatos establecidos en el protocolo KPT.

### 3.3. Prueba de emisiones intramuros (PEI versión 1.0)

La evaluación de los gases contaminantes generados durante el uso de la estufa ecológica Vilma y el fogón tradicional se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Martínez Aguirre O., la cual es una adaptación de los protocolos para la evaluación de la concentración de gases contaminantes en espacios cerrados establecidos en la Norma Boliviana NB-83001. Dichas pruebas se ejecutaron de manera simultánea a la aplicación del protocolo KPT [24, 25]. Posteriormente, los resultados obtenidos se compararon con los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y por la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) con el propósito de determinar si la tecnología mejorada es apta para su implementación en comunidades rurales.

Previo a la ejecución de esta evaluación, se realizaron algunas adecuaciones en el área de pruebas y se registraron las condiciones iniciales. Para ello, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

### Etapa previa a la evaluación

1. Se acondicionó el área de trabajo donde se colocaron los equipos de medición necesarios durante las pruebas.
2. Se ubicaron los instrumentos para la medición de emisiones intramuros a 0.5 m de la entrada de la cámara de combustión y a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo, con el fin de simular la distancia entre la tecnología y las vías respiratorias del usuario. Para este procedimiento se utilizaron un medidor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> Meter TES-1370), un medidor de monóxido de carbono (CO UNI-T modelo UT337A) y un contador de partículas (PM<sub>0.5</sub>, PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.0</sub> y otros similares) (Fluke-985 Air Particle Counter).
3. Se registraron las concentraciones iniciales de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub> en el interior de la cocina.

Finalizadas las actividades previas, se iniciaron las pruebas en la estufa ecológica Vilma y el fogón tradicional.

### Etapa de evaluación

1. Se iniciaron las mediciones simultáneamente con el encendido del fuego. Para ello, se emplearon los equipos mencionados en la etapa previa. Durante estas pruebas, se registraron las concentraciones intramuros de CO y CO<sub>2</sub> cada 5 minutos. En el caso del PM<sub>2.0</sub>, los registros se realizaron cada minuto.
2. La prueba concluyó una vez finalizadas las actividades de cocción de alimentos.

### 3.4. Cálculo del impacto económico

El análisis del impacto económico asociado al uso de la estufa ecológica Vilma se realizó con base en la metodología empleada por Zavala López y Orozco Meza [120, 121]. En este caso, se consideraron el precio del combustible de los últimos cinco años, la masa de leña adquirida durante cada período evaluado, los consumos de la tecnología mejorada

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

y la tradicional por kilogramo de alimento cocinado, así como la inversión realizada en la elaboración de la estufa Vilma. Con base en lo anterior, se siguieron los pasos descritos a continuación:

1. Se construyó la Tabla 3.1, en la que se calculó la inversión total (I) realizada durante la fabricación de la estufa ecológica de doble combustión. Esta incluye los bienes materiales adquiridos al inicio y durante el desarrollo del proyecto, así como el costo de la mano de obra.

Tabla 3.1 — Inversión fija.

No.	Recursos y herramientas	Cantidad	Precio Unitario (MXN)	Total (MXN)
1	....	....	....	....
2	....	....	....	....
3	....	....	....	....
n	....	....	....	....

2. Se determinó el incremento porcentual promedio anual en el precio de la leña ( $IPA_{comb}$ ) considerando los costos registrados durante los últimos cinco años, según la información proporcionada por el usuario. Para este cálculo, se restó el valor inicial ( $V_i$ ) al valor final ( $V_f$ ), y el resultado se dividió entre el valor inicial ( $V_i$ ).
3. Se elaboró la Tabla 3.2, en la que se calculó el costo promedio por kilogramo de leña ( $CostoP_{kg}$ ), dividiendo el valor de los lotes de combustible adquiridos durante los periodos evaluados entre la masa de leña correspondiente a cada estación.

Tabla 3.2 — Costo y masa combustible adquirida en cada temporada.

Temporada	Costo del del triciclo de combustible (MXN)	Masa total del lote de combustible (kg)	Costo equivalente del kg de combustible (MXN)
Verano	...	...	...
Otoño	...	...	...
Invierno	...	...	...
Primavera	...	...	...
<b>Promedio</b>	...	...	...

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

4. Se determinó el costo promedio equivalente del consumo semanal de leña ( $\text{CostoP}_{\text{comb/S}}$ ) de cada temporada, multiplicando la masa de combustible consumido ( $C_{\text{comb}}$ ) por el costo promedio del kilogramo de leña ( $\text{CostoP}_{\text{kg}}$ ).
5. Se construyó la Tabla 3.3, en la que se estimó el costo promedio equivalente del consumo diario de combustible por kilogramo de alimentos cocinados ( $\text{CostoP}_{\text{comb/kgA}}$ ), dividiendo el costo promedio del kilogramo de leña ( $\text{CostoP}_{\text{kg}}$ ) entre la masa de alimentos cocinados de cada período evaluado.

Tabla 3.3 — Costo del consumo de combustible estimado por kilogramo de alimento cocinado en cada temporada.

Variable	Costo semanal de combustible empleado (MXN)		Masa de alimentos cocinados semanalmente (kg)		Costo del combustible consumido diariamente por kg de alimento cocinado (MXN/kg)	
	Estufa Vilma	Fogón	Estufa Vilma	Fogón	Estufa Vilma	Fogón
<b>Temporada/Tecnología</b>						
<b>Verano</b>	...	...	...	...	...	...
<b>Otoño</b>	...	...	...	...	...	...
<b>Invierno</b>	...	...	...	...	...	...
<b>Primavera</b>	...	...	...	...	...	...
<b>Total</b>	...	...	...	...	...	...
<b>Promedio</b>	...	...	...	...	...	...

6. Se elaboró la Tabla 3.4, en la que se calcularon los flujos de efectivo (FE) utilizando la ecuación 4 a lo largo de un período de 15 años. En este análisis, se consideró el costo de elaboración del prototipo de la estufa Vilma como la inversión inicial (I), y el ahorro económico promedio diario ( $\text{AhorroP}_{\text{diario}}$ ), equivalente a la diferencia entre los costos del consumo de leña por kilogramo de alimento cocinado en la estufa ecológica ( $\text{Costo}_{\text{vilma}}$ ) y en el fogón tradicional ( $\text{Costo}_{\text{fogón}}$ ).  
Simultáneamente, se determinó el valor presente neto ( $\text{FE}_{\text{VPN}}$ ) de los flujos de efectivo mediante la ecuación 5, además del flujo acumulado ( $\text{FE}_{\text{AC}}$ ), el cual se obtuvo sumando los flujos de efectivo de los periodos anteriores al flujo del período

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

actual. Para este análisis, se aplicó una la tasa de descuento o interés ( $i$ ) del 11 %, de acuerdo con lo sugerido por el Banco de México (Banxico).

Tabla 3.4 — Flujos netos de efectivo.

Período	Egresos (MXN)	Ingresos (MXN)	FE (MXN)	F <sub>VPN</sub> (MXN)	F <sub>AC</sub> (MXN)
1	....	....	....	....	....
2	....	....	....	....	....
3	....	....	....	....	....
4	....	....	....	....	....
5	....	....	....	....	....
6	....	....	....	....	....
n	....	....	....	....	....

7. Se calculó la tasa interna de retorno (TIR) de la inversión realizada para un período de 15 años, utilizando la ecuación 6.
8. Se evaluó la relación costo-beneficio (C/B) de emplear la estufa ecológica Vilma en comparación con el fogón, mediante la ecuación 7.
9. Finalmente, se estimó el período de recuperación de la inversión (PRI) realizada para la elaboración del prototipo de la estufa Vilma, utilizando la ecuación 8.

### 3.5. Desarrollo del manual de usuario

El manual de usuario fue elaborado con base en los datos recopilados durante las encuestas y pruebas realizadas mediante los protocolos KPT y PEI, así como en los formatos utilizados en manuales de otros dispositivos. Este documento aborda, de manera breve, el estado del arte de las tecnologías de cocción de alimentos desarrolladas en México, además de incluir una descripción detallada de los componentes principales de la estufa Vilma, una metodología para una operación óptima y los procedimientos para el mantenimiento preventivo y correctivo, entre otros aspectos. Dicho esto, para su redacción se siguió el siguiente proceso:

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

1. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para delimitar y definir el contenido del manual.
2. Se estableció el formato general del manual de usuario.
3. Se elaboró una descripción detallada de los componentes principales del dispositivo, incluyendo imágenes representativas para facilitar su comprensión.
4. Se definió la metodología de operación óptima de la estufa ecológica Vilma, incorporando una imagen en cada paso del proceso para facilitar el entendimiento.
5. Se estableció el procedimiento óptimo de mantenimiento preventivo y correctivo del dispositivo.
6. Se redactaron recomendaciones sobre el uso y manejo del combustible en el dispositivo.
7. Se formuló una normativa de seguridad orientada a mantener en óptimas condiciones la integridad del dispositivo y prevenir posibles accidentes.

# CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación en condiciones reales de operación de una estufa ecológica de doble combustión Vilma. Este estudio se llevó a cabo durante las cuatro estaciones del año en un hogar compuesto por cuatro integrantes, perteneciente a la comunidad rural de San Francisco del Mar en el estado de Oaxaca.

De las pruebas ejecutadas empleando los protocolos KPT y PEI, se recabaron diversos datos que se dividieron en cualitativos y cuantitativos. La primera categoría incluye información básica sobre el lugar de evaluación, la vivienda, la adquisición del combustible empleado, las costumbres relacionadas con la cocina y las características de los dispositivos de cocción existentes. Por otro lado, la segunda clasificación engloba los valores registrados durante las mediciones realizadas tanto en la estufa ecológica como en el fogón. Estos parámetros abarcan el contenido de humedad de la leña, el consumo de combustible, las concentraciones intramuros de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub>.

A partir de los datos cualitativos recabados, se realizó el análisis del impacto económico generado por la implementación de la estufa Vilma.

### 4.2. Resultados cualitativos

En esta sección se presentan los resultados cualitativos obtenidos al implementar el protocolo KPT, mismos que proporcionaron información relevante sobre las características de la zona de estudio, las prácticas culinarias, los tipos de combustibles utilizados, las preferencias en el manejo de combustibles y los dispositivos de cocción, entre otros datos.

#### 4.2.1. Descripción de la zona geográfica de estudio

La comunidad de San Francisco del Mar, se ubica en el sureste del estado de Oaxaca en la región del Istmo de Tehuantepec. En la Figura 4.1, se observa en color rojo la extensión territorial y la posición de la cabecera municipal. Sus coordenadas geográficas

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

son 16°14'1" de latitud norte y 94°37'56" de longitud oeste, con una altitud que varía entre los 10 y 200 m sobre el nivel del mar. La localidad abarca una superficie de 680.417 km<sup>2</sup> y colinda con los municipios de San Francisco Ixhuatán, San Dionisio del Mar, Reforma de Pineda, Santo Domingo Zanatepec y San Pedro Tapanatepec [125]. De acuerdo con el último censo de población y vivienda realizado por el INEGI en 2020, la población estuvo conformada por 8,710 habitantes (4,336 mujeres y 4,334 hombres), de los cuales el 32 % eran menores de 15 años, el 23.5 % tenía entre 15 y 29 años, el 25 % entre los 30 y 49 años y el resto eran mayores de 49 años. En 2021, el INEGI reportó que el 16.7 % de la población podía comunicarse mediante alguna lengua indígena, entre las que destacan el huave, náhuatl y mixteco [125, 126].

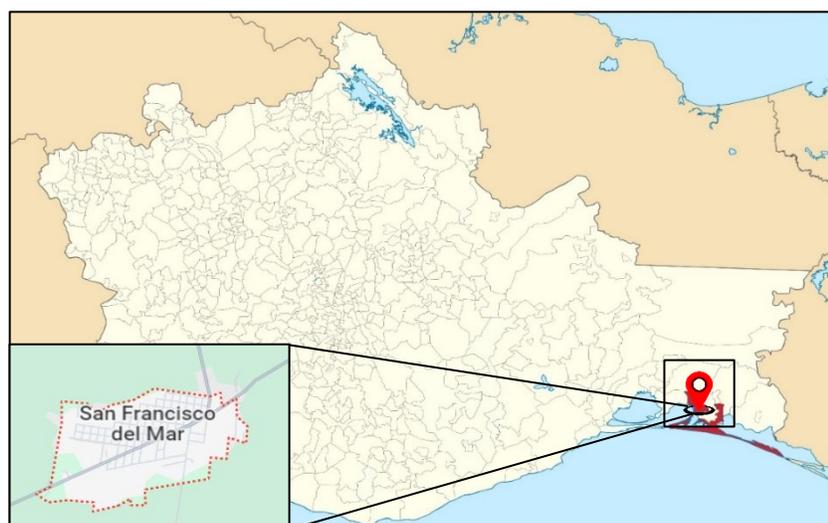


Fig. 4.1 — Región de estudio en el estado de Oaxaca [127].

De acuerdo con reportes de la Secretaría del Bienestar, en 2020, el 70.8 % de la población estaba en situación de pobreza: 51.2 % en pobreza moderada y 19.7 % en pobreza extrema [128]. Por otro lado, entre las principales carencias sociales de la comunidad se identificaron deficiencias en el acceso a la seguridad social, a los servicios básicos en la vivienda (el 75.6 % de la población no dispone de una chimenea que permita evacuar los gases generados durante la combustión de leña o carbón al cocinar), y a una alimentación nutritiva y de calidad [125].

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.2.2. Características de la vivienda

La vivienda donde se llevaron a cabo las pruebas se ubica en la zona sur de la comunidad de San Francisco del Mar, específicamente en el extremo noroeste de la manzana colindante con la calle Marcos Pérez y la avenida Felipe Enríquez. La familia habitante está compuesta por cuatro personas adultas, cuyas edades se encontraban entre 23 y 56 años, quienes se sustentan mediante el trabajo asalariado y actividades agrícolas, con un ingreso mensual promedio de aproximadamente 14,000 MXN. El sitio de evaluación cuenta con dos áreas para preparar alimentos. La primera cocina se localiza en el interior de la vivienda, donde se utiliza gas licuado de petróleo (GLP o gas LP) como combustible en una estufa comercial, como se observa en la Figura 4.2. Este dispositivo se encuentra en una habitación cerrada conformada por un techo y dos muros perpendiculares con un acabado rústico, contruidos a base de varilla corrugada de calibre 3, cemento, grava, arena fina y agua. Las dimensiones de este espacio son 3.2 m de largo, 3 m de altura, 3 m de ancho y 20 cm de grosor; la zona está conectada a un pasillo de 6 m de largo por 1 m de ancho, así como a una sala de estar de 3 m por 3 m. Además, cuenta con cuatro ventanas de 90 cm de alto por 40 cm de ancho.



Fig. 4.2 — Cocina del interior de la vivienda.

Por otro lado, la segunda cocina se encuentra en un espacio abierto, separado de la vivienda principal, en la que se emplean leña y sus derivados para cocinar, tal como se observa en la Figura 4.3. Esta área está conformada por tres paredes sin acabados (de 3 m de altura, 4.5 m de ancho y 18 cm de grosor), contruidas con los mismos materiales que la cocina interior. Sin embargo, en este caso el techo está conformado de láminas de acero

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

R-72, sujetas a perfiles tubulares rectangulares (PTR) calibre 14, de 6 m de longitud, mediante birlos de acero para techado de 3/16" (4.76 mm de diámetro) y 15.24 cm de longitud. Esta estructura se mantiene en su lugar mediante varillas de acero corrugado que sobresalen de la parte superior de seis pilares (30 cm de ancho, 30 cm de ancho y 3 m de altura) distribuidos en dos filas de tres elementos. El tejado, a su vez, cuenta con una separación de aproximadamente 4 cm respecto a los muros, lo que permite la libre circulación del aire caliente desde la base hasta la parte superior de la habitación.



Fig. 4.3 — Cocina en el exterior de la vivienda.

Retomando lo anterior, entre los dispositivos presentes en la cocina exterior se encuentran un fogón tradicional en forma de herradura (1), un horno tradicional de barro (2), un fogón móvil construido con láminas de acero galvanizado (3) y una estufa ecológica de doble combustión Vilma (4), tal como se muestra en la Figura 4.4.



Fig. 4.4 — Tecnologías de cocción que utilizan leña.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.2.3. Adquisición y uso de combustibles

Las encuestas del protocolo KPT identificaron que los usuarios emplean alternativamente leña y gas LP como combustibles en la cocción de alimentos. Específicamente, el gas LP se obtiene mediante la compra de cilindros a un distribuidor ambulante procedente de otra población. Estos contenedores tienen un costo aproximado de 460 MXN para una tanque de 20 kg y 750 MXN para los de 40 kg. Se identificó que uno de los inconvenientes para el uso continuo de este combustible es la intermitencia en la distribución, debido a que el proveedor se demora entre dos a seis semanas en regresar a la comunidad. En cuanto a la leña, ésta se adquiere preferentemente a través de la compra de porciones denominadas localmente como “tricyclos de leña” (entre 73 y 78 kg de combustible equivalente), provenientes de la flora silvestre de la zona, con un costo actual de 250 MXN. También, se consigue, en menor medida, por medio de la recolección en dos lugares a una distancia de 2 y 12 km de la vivienda.

Retomando lo anterior, el cuestionario previo a la implementación de la estufa Vilma reveló que la leña es el combustible preferido para cocinar; no obstante, se empleaba en menor medida que el gas LP, debido a que su uso genera altas emisiones de humo y cenizas, además de ocasionar un aumento considerable de la temperatura interior de la cocina, lo cual afecta la salud y el confort de los usuarios. Asimismo, esta encuesta reveló el porcentaje de uso de los combustibles a lo largo de una semana, siendo el 60 % para del gas LP y el 40 % para la leña, tal como se observa en la Figura 4.5.

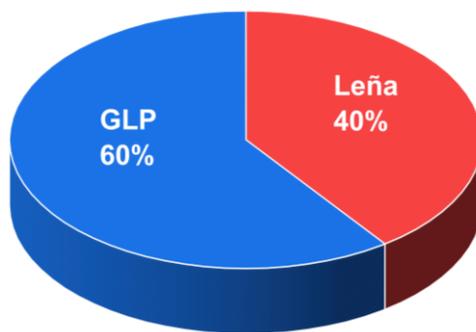


Fig. 4.5 — Porcentaje de uso de cada combustible previo a la implementación de la estufa Vilma durante un lapso de una semana.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Posterior a la implementación de la estufa Vilma, se aplicó la encuesta de seguimiento. En la Figura 4.6 se observa el porcentaje de uso de cada combustible durante una semana.

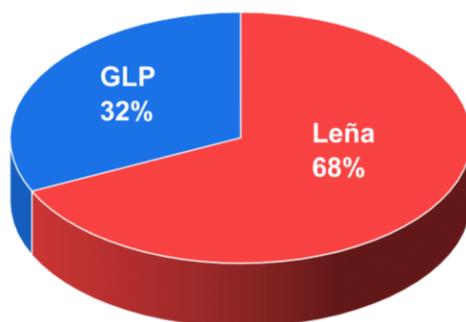


Fig. 4.6 — Porcentaje de uso de cada combustible posterior a la implementación de la estufa Vilma.

Al comparar los resultados obtenidos antes y después de la implementación de la estufa Vilma, se observó un incremento del 62.5 % en el uso semanal de la leña como combustible. De acuerdo con el usuario, al emplear este recurso se obtiene un sabor tradicional en los platillos cocinados con leña, lo cual se suma al bajo costo de la materia prima derivado de la alta disponibilidad de los recursos en la zona. Además, el uso de este dispositivo genera un ambiente cómodo para cocinar, ya que mantiene el calor aislado (no irradia el calor directamente hacia el usuario) y expulsa el humo generado mediante la chimenea hacia el exterior de la vivienda. Por el contrario, el gas LP presentó una disminución del 50 % en su frecuencia de uso en comparación con los resultados del cuestionario previo (KPT). Este combustible se utiliza principalmente para tareas de corta duración, entre las que se incluyen hervir agua y recalentar alimentos. Cabe señalar que los porcentajes mencionados se calcularon con base en el procedimiento propuesto por Espinel M. C., Bruno A. y Plasencia I. [129].

#### 4.2.4. Características de las especies dendroenergéticas utilizadas

Entre la información recopilada por las encuestas, se identificaron las principales especies arbóreas empleadas como combustible en la cocción de alimentos. Específicamente, en la zona de evaluación se reveló que los usuarios utilizan el guamúchil

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

(*Pithecellobium dulce*), el botoncillo (*Conocarpus erectus*) y el espino blanco (*Crataegus monogyna*) en sus actividades cotidianas. Estas especies de leña son preferidas debido a que mantienen la combustión durante periodos prolongados y generan mayores cantidades de carbón vegetal en comparación con otras especies disponibles. En la Tabla 4.1 se presentan las principales características de interés de los combustibles mencionados, entre las cuales destacan el poder calorífico reportado en trabajos de investigación y publicaciones científicas, las dimensiones recomendadas y el rango de humedad ideal para su uso como biocombustible sólido.

Tabla 4.1 — Características recomendadas para el aprovechamiento óptimo como combustible de las especies forestales utilizadas en la zona de evaluación [130-134].

Nombre común	Nombre científico	Dimensiones	Humedad	Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI)
Guamúchil	<i>Pithecellobium dulce</i>	Grosor: <16 cm  Longitud: 25 cm-50 cm	15 %-20 %	PCS: 22.680 MJ/kg PCI: 21.360 MJ/kg
Botoncillo	<i>Conocarpus erectus</i>		15 %-20 %	PCS: 18.56 MJ/kg PCI: 17.34 MJ/kg
Espino blanco	<i>Crataegus monogyna</i>		15 %-18 %	PCS: ~ 19.46 MJ/kg PCI: ~ 18.22 MJ/kg

En comparación con lo anteriormente mencionado, se observó que los habitantes del sitio de evaluación cocinaban utilizando trozos de leña con características distintas a las recomendadas en la Tabla 4.1, con grosores que varían entre 20 y 48 cm, y longitudes de entre 40 y 140 cm. Este combustible, a su vez, presentó un contenido de humedad promedio de 27.4 % en verano, 22.4 % en otoño, 20.6 % en invierno y 24.1 % en primavera.

### 4.2.5. Prácticas de cocción con leña

Las costumbres culinarias y técnicas de cocción en estufas de leña identificadas a partir del estudio, consisten fundamentalmente, en la incorporación de restos de cartón o papel, cortezas secas, olotes, totomoxtles e incluso diésel (cuando el combustible se encuentre muy húmedo o se dificulta el arranque de la combustión), sobre un conjunto mixto

## **CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

de 3 a 6 leños delgados (5 a 15 cm de grosor) y gruesos (15 a 48 cm de grosor) apilados de manera horizontal unos sobre otros, también se emplea un abanico para forzar la circulación del aire. Una vez iniciado el fuego, se colocan los recipientes con alimentos sobre la estufa, y se mantiene la combustión atizando el combustible cada cierto intervalo (entre 5 y 20 minutos). También se añade más leña cuando se observa que la mayor parte se ha transformado en carbón o cuando disminuye el tamaño de las llamas, dependiendo del tipo de alimento que se prepare. Al concluir la cocción, la leña restante es retirada de la estufa y los extremos con brasas se apagan empleando agua.

Por otra parte, el uso del horno tradicional de leña implica un proceso de operación ligeramente distinto. Este método inicia de la misma forma que el anterior, añadiendo cartón o papel, cortezas secas, olotes o totomoxtles e inclusive diésel (en el caso de que el combustible se encuentre muy húmedo) en el fondo del horno para comenzar la combustión. Posteriormente, se agregan entre 4 y 6 leños gruesos dispuestos en posición vertical y se espera hasta que estos se hayan convertido totalmente en carbón. Durante esta etapa, se emplea un abanico para forzar la circulación de aire y se vigila que toda la leña inicial sea consumida. Una vez concluido lo anterior, se introducen los alimentos en el horno y se espera el tiempo necesario para su cocción. A diferencia del método previamente descrito, los alimentos pueden colocarse pegados a las paredes del horno o directamente sobre las brasas, ya sea en recipientes o envueltos en hojas. Además, no queda combustible restante al finalizar las actividades de cocción.

### **4.2.6. Descripción de las tecnologías de cocción**

El cuestionario previo (KPT) permitió identificar las tecnologías de cocción existentes en el lugar de evaluación antes de la implementación de la estufa Vilma. Entre estos dispositivos se incluyen un fogón en forma de herradura, un fogón móvil fabricado de acero, un horno tradicional y una estufa de gas LP. Por su parte, la encuesta de seguimiento (KPT) permitió dimensionar el impacto de la estufa implementada en la cocina. En el siguiente apartado se describen algunas características de los dispositivos mencionados.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### ❖ Estufa de gas (GLP)

Esta tecnología está compuesta por una estructura en forma de caja hecha de una aleación de acero inoxidable y aluminio calibre 14, con una altura de 88 cm, una longitud de 72 cm y una anchura de 59 cm, la cual integra en su exterior un conjunto de seis quemadores dispuestos de manera vertical, agrupados en tres columnas de dos unidades, separadas por tres parrillas de hierro fundido (con una altura de 6 cm, una longitud de 48 cm y una anchura de 15 cm ). Además, cuenta con una sección de 120 cm<sup>3</sup> que funge como un horno dispuesto de manera horizontal a media altura de la caja metálica (altura: 62 cm, anchura: 48 cm, profundidad: 40 cm). Estos componentes son controlados por medio de siete válvulas circulares conectadas a un conjunto de ductos internos, los cuales cumplen la función de distribuir el gas LP, tal como se muestra en la Figura 4.7. De acuerdo con el usuario, este dispositivo tuvo un costo aproximado de 6,500 MXN.



Fig. 4.7 — Estufa comercial de gas LP.

Con respecto al procedimiento operativo de la estufa de gas LP, se observó que el usuario coloca primero los recipientes con alimentos sobre las parrillas. Posteriormente, la combustión se inicia girando las perillas para permitir el flujo de gas, al mismo tiempo que se acerca un cerillo encendido al quemador correspondiente. Una vez realizado lo anterior, se regula la intensidad de la llama según el tipo de alimento preparado y se espera a que el proceso de cocción finalice para cerrar nuevamente el paso del combustible, lo cual marca el final de las actividades de cocción.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Retomando lo anterior, entre las ventajas asociadas al uso de la estufa de gas LP en comparación con los dispositivos de cocción que utilizan leña, se incluyen breves tiempos de cocción, nula adherencia de hollín a los recipientes, menor generación de contaminantes atmosféricos, así como una mayor comodidad y seguridad durante el uso. Por el contrario, entre las desventajas se encuentran la limitada disponibilidad del combustible en la zona de evaluación, además de los elevados costos de adquisición del mismo y la ausencia del característico sabor tradicional de los alimentos cocinados con leña, según la percepción del usuario.

### ❖ Fogón móvil de láminas de acero

Este dispositivo está fabricado de láminas de acero galvanizado calibre 18 y conforma una pequeña cámara de combustión cuadrada, cuya pared superior está sustituida por una malla removible de acero desplegado calibre 8. Sus dimensiones son de 20 cm de alto por 40 cm de largo y 40 cm ancho. La estructura se encuentra unida, a una mesa rectangular, hecha del mismo material, que mide 100 cm de largo, 40 cm de ancho y 2 cm de grosor, y sirve para sostener el combustible. Todo lo anterior se encuentra sostenido por cuatro perfiles tubulares (PTR) calibre 14, colocados a una altura de 75 cm sobre el suelo, tal como se muestra en la Figura 4.8.

Por otro lado, el proceso de cocción se lleva a cabo utilizando un conjunto de entre cuatro y seis leños dispuestos horizontalmente, colocando uno de sus extremos en el interior de la caja metálica, mientras que el resto descansa sobre la mesa de soporte. Seguidamente, se agregan restos de papel, olotes, totomoxtles o cortezas secas; en caso de que el combustible se encuentre muy húmedo se emplea diésel para facilitar aún más el arranque del proceso. Una vez realizado lo anterior, se enciende el fuego utilizando cerillos, se coloca la malla de soporte y, posteriormente, los recipientes con alimentos. Durante esta fase, el fuego se controla atizando y añadiendo más combustible cuando se observa una disminución de las llamas, así como forzando la circulación del aire si es necesario. Finalmente, al concluir las tareas de cocinado, se apagan las brasas humedeciendo los extremos de la leña restante con agua.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



Fig. 4.8 — Fogón de láminas de acero.

Retomando lo mencionado, de acuerdo con los usuarios, este modelo presenta diversas desventajas en comparación con la estufa de gas LP, tales como un elevado consumo de combustible, altas emisiones de contaminantes gaseosos y baja seguridad durante su operación. Del mismo modo, entre las ventajas se incluyen la portabilidad del dispositivo, tiempos de cocción de alimentos similares y la obtención de sabores tradicionales.

### ❖ Fogón en forma de U o tipo herradura

Este dispositivo está constituido principalmente por una estructura de lodo y barro solidificado en forma de U o herradura, cuyas dimensiones son 55 cm de longitud, 40 cm de anchura y 15 cm de grosor. Sobre la estructura se coloca un par de varillas corrugadas calibre 3 o una malla de acero desplegado calibre 8, que sirven como soporte para un recipiente a la vez. Todo lo anterior descansa sobre una base de 2.5 m de largo, 1.2 m de ancho y 65 cm de alto, formada por muros de ladrillos de arcilla (20 cm de largo, 13 cm de ancho y 4 cm de grosor por unidad), bloques de cemento (30 cm de largo, 14 cm de grosor y 15 cm de altura por unidad) y barro solidificado, tal como se observa en la Figura 4.9. De acuerdo con el usuario, la fabricación de este modelo de estufa de leña se realiza habitualmente de manera artesanal por los propios habitantes de la comunidad, por lo que no existe un costo fijo de elaboración. Sin embargo, su precio es de aproximadamente 100 MXN cuando es construido por un tercero, mientras que la elaboración del soporte o plataforma tiene un costo estimado de aproximadamente 1,500 MXN.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de cocción en el fogón tipo herradura inicia apilando leños delgados y gruesos de manera horizontal en el espacio vacío de la herradura. A continuación, se emplean restos de papel, olotes, totemoxtles, cortezas secas e incluso diésel si fuese necesario como iniciadores de la combustión. Posteriormente, se enciende el fuego utilizando cerillos y se mantiene mediante la circulación forzada de aire, atizando el combustible y añadiendo más cuando se requiera. Una vez finalizada la cocción, se retira el combustible restante de la estufa y se apagan las brasas humedeciendo los extremos de la leña restante con agua.



Fig. 4.9 — Fogón tradicional en forma de herradura en la vivienda evaluada.

Contemplando lo observado durante las pruebas y la percepción del usuario al utilizar este dispositivo, se identificó como ventaja principal el reducido tiempo de cocción requerido en comparación con otras tecnologías de cocción que emplean leña. Sin embargo, entre sus desventajas destacan la nula portabilidad de la estufa y el rápido desgaste de la estructura de barro. Con respecto a la estufa de gas LP, se señalaron como aspectos positivos el bajo costo del combustible y la obtención de sabores tradicionales en los platillos. Por el contrario, entre las desventajas se incluyen el elevado consumo de combustible, la generación de altas concentraciones de humo durante la combustión, la adherencia del hollín en los recipientes, la exposición directa del usuario al fuego y la falta de movilidad del dispositivo.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### ❖ Horno tradicional

Este dispositivo está compuesto por una olla de barro cocido, con un diámetro de 50 cm y una altura de 60 cm, ubicada en el interior de una base en forma de caja que sirve de soporte. La plataforma presenta unas dimensiones de 2.5 m de largo, 1.5 m de ancho y 65 cm de alto, y está conformada por paredes construidas de ladrillos de arcilla (20 cm de largo, 13 cm de ancho y 4 cm de grosor por unidad) y bloques de cemento (30 cm de largo, 14 cm de grosor y 15 cm de altura por unidad). El interior de la estructura se encuentra relleno con una mezcla de lodo y barro solidificado, con excepción del interior de la vasija, tal como se aprecia en la Figura 4.10.

Al emplear esta tecnología, el proceso de cocción se inicia colocando restos de papel, olotes, totomoxtle en el fondo del horno. Seguidamente, se enciende el fuego utilizando cerillos y se introducen entre cinco y seis leños gruesos en posición vertical. Durante esta etapa, la combustión se controla mediante un abanico para impulsar aire hacia el interior del dispositivo. Una vez que el combustible se consume por completo, se coloca la comida envuelta en hojas, adherida a las paredes o en recipientes, en el interior del horno. A diferencia de los modelos anteriores, en este caso no se retiran ni se apagan las brasas al finalizar la cocción.



Fig. 4.10 — Horno tradicional de barro en el lugar de evaluación.

Entre los aspectos positivos señalados por los usuarios del horno tradicional se destacan la seguridad durante el uso y la obtención de un sabor característico en los

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

alimentos. No obstante, entre las desventajas identificadas, en comparación con los modelos previamente descritos, se incluyen un mayor consumo de leña, la exposición a las elevadas concentraciones de contaminantes liberados en el interior de la cocina y la ausencia de movilidad del dispositivo.

### ❖ Estufa ecológica Vilma

La estufa ecológica de doble combustión Vilma está conformada principalmente por una cámara de combustión, una chimenea o ducto para la expulsión de gases y una base o estructura de soporte. Esta última se fabrica de acuerdo con las preferencias del usuario, tal como se muestra en la Figura 4.11.



Fig. 4.11 — Estufa ecológica de doble combustión Vilma

La cámara de combustión de la estufa Vilma está integrada por una estructura central, elaborada con una lámina de acero calibre 20 conformada mediante múltiples dobleces, con dimensiones de 65 cm de longitud, 38.6 cm de anchura y 26.2 cm de altura. Este elemento tiene la función de brindar soporte al combustible, así como integrar y unificar los componentes y materiales térmicos del dispositivo.

Entre los elementos internos que constituyen la cámara de combustión se incluyen ladrillos cocidos de arcilla y fibra cerámica, estos materiales actúan como aislantes térmicos del calor liberado durante la combustión de la leña. Asimismo, se incorpora un retardador de llamas, fabricado a partir de una placa y un tubo de acero, cuya función es propiciar un

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

flujo turbulento de aire primario y permitir el ingreso de aire secundario a través de orificios ubicados en la parte inferior de la estructura central y el extremo superior del retardador.

De la misma forma, en la parte superior externa del dispositivo se integra un comal de hierro desmontable, elaborado con una placa de hierro calibre 10, cuya función es transferir el calor generado durante la combustión a los recipientes con alimentos. Por otro lado, cada costado lateral integra tablas para aislar el calor conducido por los elementos metálicos, así como un par de soportes de madera para recipientes y utensilios, con dimensiones de 65 cm de longitud, 20 cm de anchura y 4 cm de grosor. Estas dos últimas estructuras se fijan al aislante externo por medio de ménsulas y tornillos.

Todos los componentes mencionados se encuentran unidos a un par de tapas metálicas de 46.5 cm de longitud y 32 cm de anchura, fabricadas con lámina de acero calibre 16. La placa frontal tiene la función de permitir el ingreso de leña y la circulación de aire mediante un par de aberturas rectangulares, con dimensiones de 12 cm por 18 cm para la entrada de combustible y de 5 cm por 28 cm para la entrada del conducto de circulación de aire primario y secundario. Por su parte, la placa posterior se ubica en el extremo opuesto del dispositivo y tiene como función permitir el acople con la chimenea para la expulsión de los gases generados durante la combustión.

Por su parte, la chimenea está conformada por un par de tubos de acero de 91 cm de longitud y 9.2 cm de diámetro, unidos a un codo de 90° fabricado con el mismo material. Esta última pieza se acopla a la cubierta posterior de la cámara de combustión para evacuar los gases contaminantes generados hacia el exterior del área de cocinado. Con base en los materiales empleados para la elaboración del prototipo de la estufa ecológica Vilma, se estimó un costo aproximado de 2,200 MXN. En el caso del dispositivo evaluado, se incorporó una base construida con bloques de cemento (de 19 cm de ancho, 38 cm de largo y 14.5 cm de grosor por unidad), con dimensiones totales de 76 cm de longitud, 76 cm de anchura y 72.5 cm de altura.

Entre las ventajas reportadas por los beneficiarios de la estufa Vilma, en comparación con los dispositivos de cocción con leña previamente descritos, destacan el ahorro en el consumo de combustible, la reducción de las emisiones intramuros, la seguridad durante su uso y la capacidad de conservar el calor generado durante periodos

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

prolongados. Por el contrario, entre las desventajas se señalan mayores tiempos de encendido y de cocción de los alimentos, así como un espacio limitado para introducir el combustible.

### 4.3. Resultados cuantitativos

Las pruebas realizadas mediante la metodología KPT arrojaron información relevante sobre el consumo y la humedad de la leña utilizada para cocinar en un fogón tipo herradura y en una estufa ecológica de doble combustión Vilma, empleando consecutivamente cada dispositivo durante un período de siete días en cada época del año. Asimismo, la aplicación de la PEI permitió obtener datos sobre la concentración intramuros de algunos de los principales contaminantes generados por la combustión de biomasa leñosa. En esta sección se presentan los resultados cuantitativos resultantes de la implementación de las metodologías mencionadas.

#### 4.3.1. Variación de la humedad del combustible en cada estación del año

Los estudios realizados mediante el protocolo KPT tienen como objetivo evaluar múltiples parámetros, entre ellos el contenido de agua presente en la biomasa, expresado en porcentaje. En la Figura 4.12 se presentan algunas de las mediciones de humedad realizadas sobre leña de espino blanco, utilizando un medidor de pines marca Mestek, modelo WM700.



Fig. 4.12 — Mediciones del contenido de humedad de la leña (base seca).

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

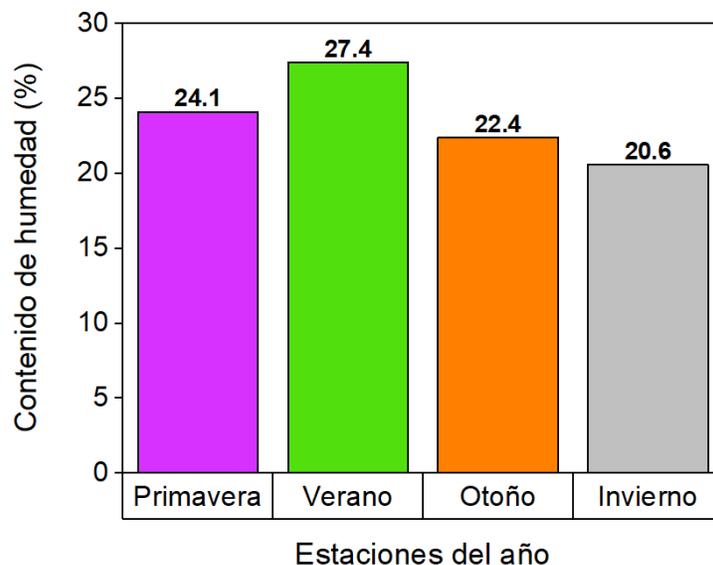


Fig. 4.13 — Variación de la humedad del combustible a lo largo del período evaluado.

La Figura 4.13 muestra el contenido de humedad promedio, en base seca, de la leña de Espino blanco utilizada durante las evaluaciones de la estufa ecológica Vilma y el fogón tradicional en cada temporada del año. Se observa que el valor medio de este parámetro se mantuvo de forma constante por encima del rango óptimo de 10 % al 19% recomendado por Bulcha Gute y colaboradores para lograr una combustión eficiente [135, 136].

Un parámetro no contemplado por la metodología KPT es la humedad atmosférica o relativa; sin embargo, ya que este factor influye en el tiempo de secado de los combustibles e, indirectamente, en el arranque del proceso de combustión, fue considerado para este estudio. De acuerdo con datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), el sitio de evaluación presentó una humedad relativa promedio de 83.9 % en verano, 83.1 % en otoño, 82.7 % en invierno y 70.4 % en primavera [101]. Cabe señalar que dichos valores no se encuentran dentro del rango recomendado para lograr una combustión completa y eficiente, de acuerdo con lo reportado por Wade y Lundsford [137].

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.3.2. Consumo de combustible y masa de alimentos cocinados en cada estación del año

La implementación de la KPT permitió obtener la masa total de leña utilizada diariamente ( $C_{comb}$ ) y la masa correspondiente de alimentos preparados en las tecnologías evaluadas durante cada estación del año. Para ello, se empleó una báscula electrónica de la marca Torrey, modelo LEQ-10, como se observa en las Figuras 4.14 y 4.15. Los resultados obtenidos se plasmaron en las Figuras 4.16 y 4.17 respectivamente.



Fig. 4.14 — Cocción de alimentos: A) estufa ecológica Vilma y B) fogón tradicional.



Fig. 4.15 — Medición del: C) consumo de combustible y D) masa de alimentos cocinados.

En relación con lo anterior, la Tabla 4.2 presenta características relevantes de la familia beneficiaria de la estufa ecológica Vilma, consideradas en el análisis estandarizado conforme a la metodología KPT. Entre estos datos se incluye el número de personas que consumieron los alimentos preparados, clasificados según edad y género.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 4.2 — Integrantes de la vivienda evaluada de acuerdo con la clasificación de los factores de equivalencia de adulto estándar (SAE).

COMPOSICIÓN DE LA FAMILIA BENEFICIARIA DE LA ESTUFA VILMA	
Categoría	Cantidad
Niños (0 – 14 años)	1*
Mujeres adultas (> 14 años)	2**
Hombre adulto (15 – 59 años)	2
Hombre mayor (> 59 años)	0

\* Este usuario solo estuvo presente durante las evaluaciones de invierno de la estufa Vilma.

\*\*Uno de estos usuarios no estuvo presente durante las evaluaciones de otoño y primavera.

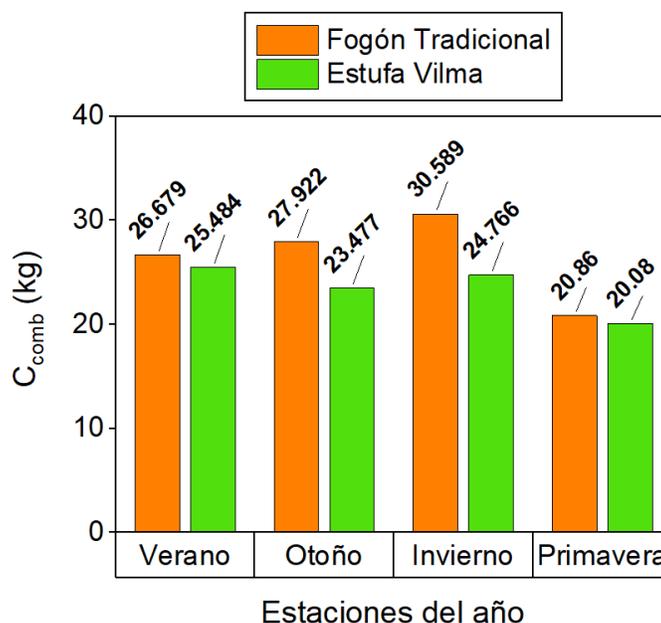


Fig. 4.16 — Consumo de combustible en el fogón tradicional y en la estufa ecológica Vilma durante cada época del año.

De la Figura 4.16 se aprecia que las tecnologías evaluadas mantuvieron un consumo similar de leña húmeda en cada estación del año. Al emplear el fogón tradicional se obtuvo un consumo total de 106.05 kg, con una media diaria de 3.79 kg, mientras que la estufa Vilma presentó un total de 93.804 kg, con un promedio diario de 3.35 kg. En tal

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

sentido, la tecnología mejorada mostró una reducción del 11.55 % en el consumo de combustible en comparación con el fogón tradicional. Este valor es inferior a lo reportado por Arreola Gómez C. en condiciones de laboratorio (25 % de reducción), lo cual se atribuye a diversos factores, entre ellos las prácticas culinarias, el tipo de combustible empleado, el poder calorífico del mismo, los tipos de platillos preparados, así como las características climáticas y geográficas de la zona, tal como lo señalan los trabajos de Mapereka Francis C. et al., Manaye A. y colaboradores [52, 57].

Asimismo, se realizó un análisis estandarizado de la información presentada en la Tabla 4.2 y la Figura 4.16, empleando las ecuaciones descritas por Bailis et al. en la KPT versión 3.0. Para simplificar el procesamiento de los datos, se utilizó la hoja de cálculo desarrollada por la fundación Shell, la cual considera los factores de equivalencia para adultos estándar (SAE, por sus siglas en inglés) indicados en el anexo A. Los resultados mostraron que, durante las evaluaciones del fogón tradicional, se prepararon alimentos para 3.45 adultos estándar, mientras que en el caso de la estufa Vilma, el mismo proceso correspondió para 3.58 usuarios. El consumo per cápita promedio fue de 0.89 kg de leña seca y 1.096 kg de combustible húmedo al utilizar el fogón; en contraste, se obtuvieron valores de 0.76 kg (leña seca) y 0.939 kg (leña húmeda) al emplear la estufa Vilma. Estos valores indican que la tecnología mejorada redujo en un 14.6 % el consumo por persona de combustible seco y en un 14.3 % el de combustible húmedo, lo que equivale a un ahorro per cápita de 32.85 kg de leña húmeda, una disminución de 109.64 MXN en la compra de combustible por usuario y una mitigación de 80.56 kg de CO<sub>2</sub>e, de acuerdo con el factor reportado en el informe técnico del convenio del INECC/A1-008/2014, publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los reportados en diversos trabajos a nivel internacional, se identificó que la estufa Vilma presentó un rendimiento similar a lo publicado por Manaye Ashenafi, Awais Junejo, Mark A. Lung, SNV Vietnam y colaboradores, quienes documentaron ahorros de combustible, al implementar tecnologías mejoradas frente a estufas tradicionales, con valores comprendidos entre 12.7 % y el 39.6 % en base húmeda, y entre 15.4 % y el 34 % en base seca [57, 69, 138, 139]. Cabe destacar que a diferencia de las fuentes consultadas, este estudio estuvo limitado por el reducido número de unidades implementadas y por el uso de leña con contenidos de humedad

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

superiores al rango recomendado para una combustión eficiente. Asimismo, con base en la experiencia adquirida mediante la aplicación de la KPT, se recomienda incorporar, entre los principales parámetros culinarios evaluados, la masa de alimentos cocinados y los tiempos de cocción, con el fin de obtener resultados más fieles a la realidad y generar información adicional útil para la optimización y desarrollo de las tecnologías.

Continuando con lo anterior, en este estudio se consideraron los parámetros sugeridos en el párrafo previo, entre ellos la masa de alimentos cocinados en la estufa Vilma y el fogón tradicional durante cada temporada del año, justo como puede observarse en la Figura 4.17. Asimismo, al comparar el parámetro mencionado con el consumo de combustible de las tecnologías evaluadas (Figura 4.16), se realizó un análisis que se plasmó en el siguiente párrafo.

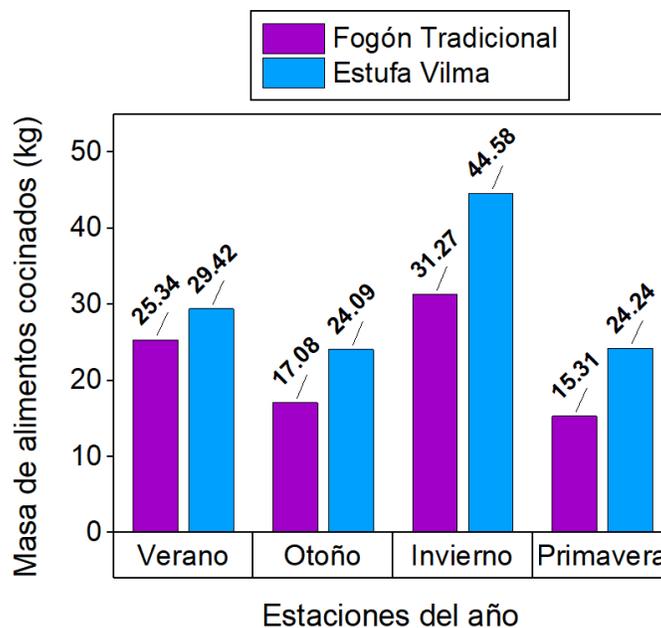


Fig. 4.17 — Masa de alimentos cocinados en el fogón tradicional y en la estufa ecológica Vilma durante cada época del año.

La Figura 4.17 presenta la masa de alimentos cocinados en cada temporada del año, durante los cuales se cocinó un total de 89 kg en el fogón y 122.33 kg en la estufa Vilma. A partir de estos valores, se determinó que la tecnología mejorada permitió preparar un total de alimentos un 37.45 % mayor en comparación con el modelo tradicional. Esta

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

diferencia se atribuye al diseño ergonómico de la estufa Vilma, que conserva el calor generado durante largos periodos gracias a los materiales térmicos que la constituyen. Asimismo, su estructura permite cocinar de manera segura varios platillos de manera simultánea y mantener un ambiente más agradable dentro de la cocina, al redirigir y expulsar fuera del área de cocinado las emisiones de gases generadas durante la combustión.

Al analizar simultáneamente las Figuras 4.16 y 4.17, se identificó que el uso de la estufa Vilma permitió un ahorro del 35.65 % en el consumo total de leña por cada kilogramo de alimento cocinado en comparación con el fogón tradicional. Asimismo, se estimó un ahorro anual per cápita de 147.2 kg de combustible y una mitigación de 296.33 kg de CO<sub>2</sub>e por usuario. En las pruebas realizadas en condiciones reales de operación, al cocinar 1 kg de frijoles se registró un tiempo de cocción promedio de 124 minutos. De acuerdo con el Apéndice E (Pruebas de eficiencia y funcionalidad) de la norma mexicana NMX-Q-001-NORMEX-2018, este desempeño puede calificarse como “Bueno” (3 puntos). No obstante, es importante señalar que para alcanzar la calificación máxima (4 puntos) el tiempo de cocción debe ser inferior a 120 minutos, lo que representa una diferencia de apenas 4 minutos respecto al valor obtenido. Por otra parte, considerando el Apéndice B (Tablas de puntaje para la prueba de seguridad), se obtuvo el mismo resultado (3 puntos) en el apartado “Bordes y puntos afilados”. Finalmente, en este mismo apéndice, los apartados “Temperatura de partes no metálicas para la manipulación de la estufa”, “Fuego o flamas alrededor de la superficie de cocinado” y “Fuego o flamas saliendo de la cámara de combustión y ductos” pueden calificarse como “Lo mejor” (4 puntos).

### 4.3.3. Emisiones intramuros

Las pruebas realizadas mediante la aplicación de la PEI en el fogón tradicional y la estufa ecológica de doble combustión Vilma permitieron determinar las concentraciones intramuros de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub>. En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestra la ejecución de la PEI.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



Fig. 4.18 — Evaluaciones de las emisiones intramuros del fogón.



Fig. 4.19 — Evaluaciones de las emisiones intramuros en la estufa ecológica Vilma.

### 4.3.3.1. Monóxido de carbono intramuros

Entre los parámetros evaluados mediante la aplicación de la PEI se encuentra el monóxido de carbono (CO). En la Figura 4.20 se presentan las concentraciones intramuros de este contaminante registradas en función del tiempo al utilizar el fogón tradicional en cada estación del año, durante las cuales se obtuvieron los siguientes valores máximos y promedios respectivamente.

- **Verano:** 23.33 ppm y 8.74 ppm
- **Invierno:** 18.32 ppm y 4.31 ppm
- **Otoño:** 19.63 ppm y 6.77 ppm
- **Primavera:** 15.9 ppm y 8.4 ppm

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Fogón Tradicional

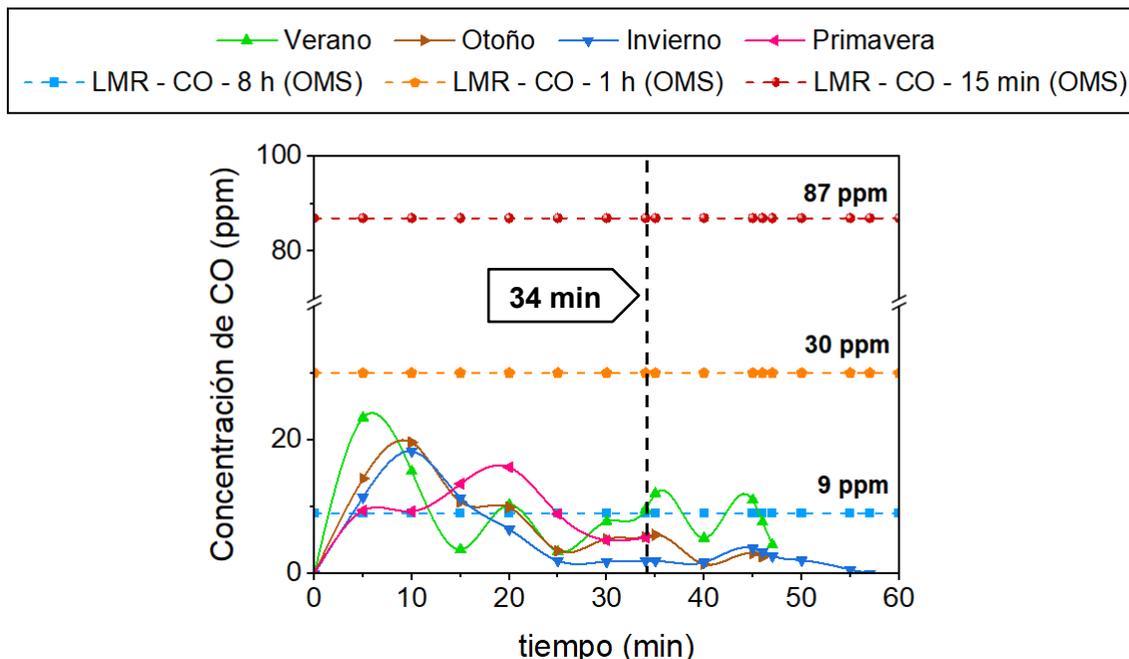


Fig. 4.20 — Emisiones intramuros promedio de monóxido de carbono (CO) generadas al emplear el fogón tradicional en cada temporada del año.

En la Figura 4.20 se observa que, al emplear la tecnología tradicional en un espacio abierto, se registraron valores que excedieron en múltiples intervalos uno de los límites establecidos por la OMS para la concentración intramuros de CO (LMR-CO-8 h: 9 ppm para 8 h; LMR-CO-1 h: 30 ppm para 1 hora; y LMR-CO-15 min: 87 ppm para 15 minutos). Estos valores indican las concentraciones y los periodos de exposición en los que el usuario puede permanecer en contacto con dicho ambiente sin que su salud se vea afectada. Con base en lo anterior, se registró en verano una concentración máxima que superó hasta en 159.2 % el límite recomendado para un máximo de 8 h, del mismo modo, se observó un comportamiento similar en otoño (118.1 %), invierno (103.5 %) y primavera (76.6 %). Asimismo, se determinó que estos valores son inferiores entre un 22.2 % y un 47 % respecto al límite de 1 h, y de un 73.2 % a un 81.7 % en relación con el límite de 15 minutos.

Sumado a lo anterior, al evaluar los valores registrados en cada temporada en el mismo período de 34 minutos, se identificó que en verano se alcanzó la concentración más alta (9.6 ppm), mientras que en primavera (5.4 ppm) y otoño (5.5 ppm) se obtuvieron valores

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

similares; finalmente en invierno se presentó la cifra más baja (1.9 ppm). De acuerdo con Geronimo, Meier y colaboradores, esta variabilidad puede atribuirse a diversos factores que influyen tanto en la eficiencia del proceso de combustión como en la dispersión del compuesto gaseoso, entre los que se incluyen las condiciones climáticas presentes durante las evaluaciones y las características del combustible, tales como la velocidad de renovación del aire en la cocina, la temperatura ambiente, la concentración de oxígeno y el contenido de humedad de la leña [140, 141].

Por otro lado, comparando los resultados expuestos previamente con el estado del arte, se observó que se obtuvieron valores similares a los publicados por Vicente E.D., Adianimovie S. y colaboradores, lo que respalda la correcta ejecución del protocolo [142, 143]. Asimismo, se identificó que la exposición continua a las concentraciones registradas al emplear el fogón conlleva riesgos para la salud de los usuarios, ya que, de acuerdo con diversos reportes y estudios, el contacto a corto plazo con altas concentraciones de CO puede ocasionar dolores de cabeza, mareos, fatiga, náuseas, pérdida del conocimiento, fallos respiratorios e incluso la muerte. A su vez, la exposición prolongada con este compuesto puede derivar en diversas enfermedades respiratorias, cutáneas y oculares, entre otras [144-147].

Al igual que en la gráfica anterior, la Figura 4.21 presenta las concentraciones intramuros de CO al emplear la estufa ecológica Vilma durante las tareas de cocción en cada estación del año, en las cuales se obtuvieron los siguientes valores máximos y promedios

- **Verano:** 0.63 ppm y 0.06 ppm
- **Invierno:** 0.3 ppm y 0.03 ppm
- **Otoño:** 0.47 ppm y 0.05 ppm
- **Primavera:** 0 ppm y 0 ppm

De acuerdo con la Figura 4.21, las emisiones intramuros de CO generadas al utilizar la estufa Vilma se mantuvieron por debajo de los límites establecidos por la OMS. Con relación a lo anterior, en verano se registró la concentración máxima, la cual fue un 93 % inferior al límite para 8 h recomendado por dicho organismo. Esta misma tendencia se observó en otoño (94.7 %), invierno (96.6 %) y primavera (100 %). Asimismo, los valores

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

obtenidos se mantuvieron entre un 97.9 % y un 100 % por debajo de los límites de 1 h y 15 minutos.

### Estufa Vilma

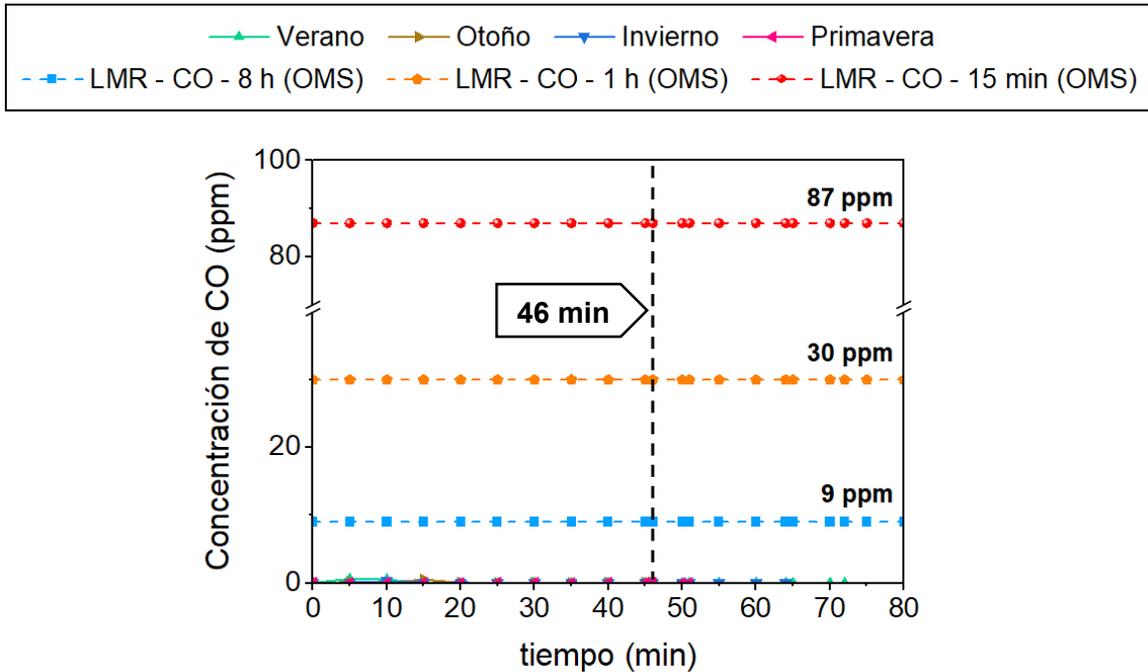


Fig. 4.21 — Emisiones intramuros promedio de monóxido de carbono (CO) al utilizar la estufa ecológica Vilma en cada época del año.

Al comparar los resultados de las tecnologías evaluadas se determinó que al utilizar la estufa Vilma se obtuvo un 97.2 % menos concentración de CO en relación con la registrada al utilizar el fogón durante la temporada de verano y otoño. Paralelamente, esta reducción fue de un 98 % en invierno y del 100 % en primavera. Asimismo, al analizar los resultados obtenidos en cada estación durante un mismo lapso de 46 minutos, se registró una concentración de 0 ppm en todas las estaciones. Este comportamiento se atribuye principalmente al buen desempeño de la tecnología mejorada, que permite expulsar la mayor parte de las emisiones al exterior de la cocina, además de la circulación del aire en la habitación. De igual forma, se identificó un comportamiento similar en las evaluaciones de laboratorio reportadas por Arreola Gómez C. [25]. Por otro lado, considerando la Norma Boliviana NB-83001, descrita en el anexo B, se obtuvo una disminución de la concentración

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

relativa del 98.1 %, lo que permite calificar al dispositivo como apto para su implementación en zonas rurales [119].

### 4.3.3.2. Dióxido de carbono intramuros

Otro contaminante evaluado mediante la aplicación de la PEI fue el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En la Figura 4.22, se presentan las concentraciones intramuros de este contaminante en función del tiempo al utilizar el fogón tradicional en cada época del año, registrándose los valores máximos y promedios plasmados a continuación:

- **Verano:** 448.7 ppm y 408.8 ppm
- **Otoño:** 611.4 ppm y 536.3 ppm
- **Invierno:** 445.3 ppm y 419.5 ppm
- **Primavera:** 526.2 ppm y 417.5 ppm

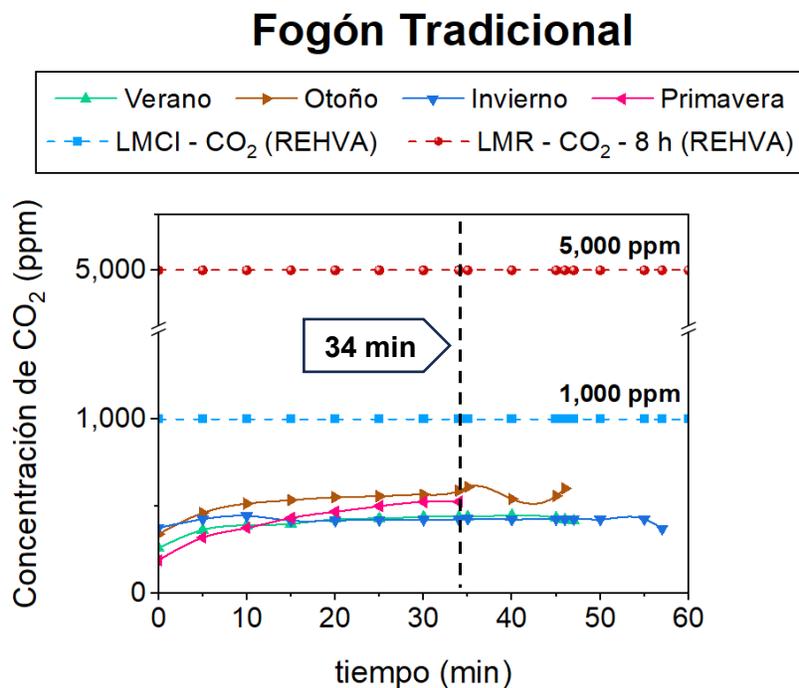


Fig. 4.22 — Emisiones intramuros promedio de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) generadas al emplear el fogón tradicional en cada temporada del año.

De la Figura 4.22 se aprecia que, al emplear la tecnología tradicional, se registraron valores menores a los límites recomendados para interiores por la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) en

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

relación con el CO<sub>2</sub>. Esta institución establece una concentración de 1000 ppm (LMCI-CO<sub>2</sub>) como la calidad mínima confiable en espacios cerrados, dado que la exposición a una concentración inferior a este rango no genera efectos adversos en la salud de los usuarios. Asimismo, fija un límite de 5000 ppm (LMR-CO<sub>2</sub>-8 h) para un período máximo de exposición de 8 h, ya que el contacto con esta concentración durante un período mayor o igual al mencionado puede ocasionar problemas de salud.

Al examinar la Figura 4.22, se observa que los niveles máximos de CO<sub>2</sub> registrados se mantuvieron entre un 38.8 % (en otoño) y un 55.4 % (verano e invierno) por debajo del límite de calidad mínima confiable en interiores. Asimismo, estas concentraciones fueron inferiores entre un 87.7 % (en otoño) y un 91 % (en verano e invierno) respecto al valor establecido en un período máximo de 8 h. Considerando las concentraciones de cada temporada en un mismo tiempo de 34 minutos, se identificó la más elevada en otoño (589.6 ppm), seguida por primavera (526.2 ppm), verano (439.7 ppm) e invierno (426.4 ppm). De acuerdo con Geronimo C., Meier F. y colaboradores, el nivel de estas emisiones se encuentra influenciado por los mismos factores que intervienen en la generación del CO, así como por la presencia de seres vivos que exhalan este compuesto [140, 141]. Por último, al relacionar los valores registrados con los reportados en otros estudios se determinó que fueron semejantes a los publicados por Vicente E.D., Adianimovie S. y colaboradores, lo que respalda la correcta ejecución del protocolo de evaluación [142, 143].

Por otra parte, la Figura 4.23 muestra la concentración intramuros de CO<sub>2</sub> al utilizar la estufa ecológica Vilma para cocinar durante cada época del año, registrándose las concentraciones máximas y promedios, las cuales se presentan a continuación:

- **Verano:** 361.7 ppm y 323.6 ppm
- **Invierno:** 488 ppm y 467 ppm
- **Otoño:** 472.1 ppm y 427.9 ppm
- **Primavera:** 369.8 ppm y 334.1 ppm

De la Figura 4.23 se aprecia que las concentraciones intramuros de CO<sub>2</sub> registradas al emplear la estufa Vilma se mantuvieron por debajo de los límites recomendados por la REHVA. Asimismo, se identificó que los niveles máximos de CO<sub>2</sub> fueron entre un 51 % (en invierno y otoño) y un 64 % (en primavera y verano) inferiores al límite de calidad confiable

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

en espacios cerrados, y entre un 90 % (en invierno y otoño) y un 93 % (en verano y primavera) menores con respecto al límite recomendado para un máximo de 8 h.

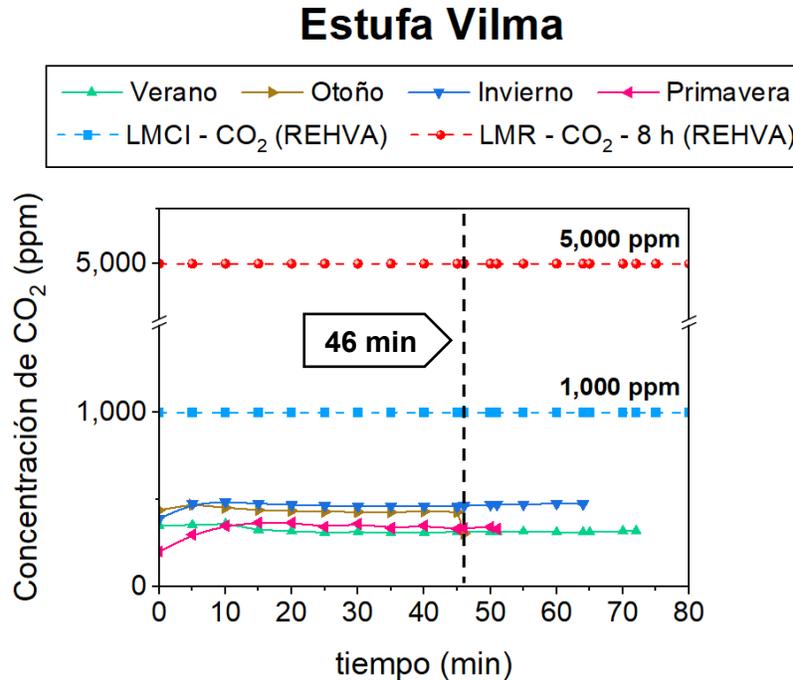


Fig. 4.23 — Emisiones intramuros promedio de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al utilizar la estufa ecológica Vilma en cada época del año.

Tomando en cuenta los resultados presentados en las Figuras 4.22 y 4.23, se determinó que la concentración máxima de CO<sub>2</sub> registrada al emplear la estufa Vilma durante la temporada de verano fue un 19 % inferior al valor registrado con el fogón. De igual forma, esta reducción fue del 22.8 % en otoño y 29.7 % en primavera. No obstante, durante el invierno las emisiones generadas al utilizar la tecnología mejorada, superaron en un 9.6 % la concentración registrada al utilizar el fogón. Adicionalmente, al examinar los datos correspondientes a un período de 46 minutos, se encontró que la concentración más alta se presentó en invierno (466.4 ppm), mientras que en primavera (338.8 ppm), verano (316.3 ppm) y otoño (306.8 ppm) se observó un comportamiento más uniforme. En este caso, el incremento en invierno puede atribuirse principalmente a la presencia de un mayor número de usuarios durante las actividades de cocción. Esta tendencia es similar a la reportada por Arreola C. en pruebas de laboratorio [25]. Por último, es importante señalar que estas emisiones se consideran neutras al emplear leña, ya que el aprovechamiento

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

energético de este biocombustible libera una cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente a la absorbida por las plantas durante su ciclo de vida, formando parte del ciclo natural del carbono, de acuerdo con Zavaleta Castellón R. y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [148, 149].

### 4.3.3.3. Material particulado fino intramuros de 2.0 micras

El último parámetro evaluado mediante la aplicación de la PEI fue la concentración intramuros del material particulado fino con un diámetro aerodinámico de 2.0 micras (PM<sub>2.0</sub>). En la Figura 4.24 se presenta una estimación de este contaminante en función del tiempo al emplear la tecnología tradicional durante cada estación del año. Para dicho cálculo se consideró un factor de densidad para las partículas de 1.5 g/cm<sup>3</sup>, con el cual se obtuvieron las concentraciones máximas y promedios que se detallan a continuación.

- **Verano:** 10.1 µg/m<sup>3</sup> y 7.7 µg/m<sup>3</sup>
- **Otoño:** 12.5 µg/m<sup>3</sup> y 9.7 µg/m<sup>3</sup>
- **Invierno:** 12.6 µg/m<sup>3</sup> y 9.5 µg/m<sup>3</sup>
- **Primavera:** 9.4 µg/m<sup>3</sup> y 6 µg/m<sup>3</sup>

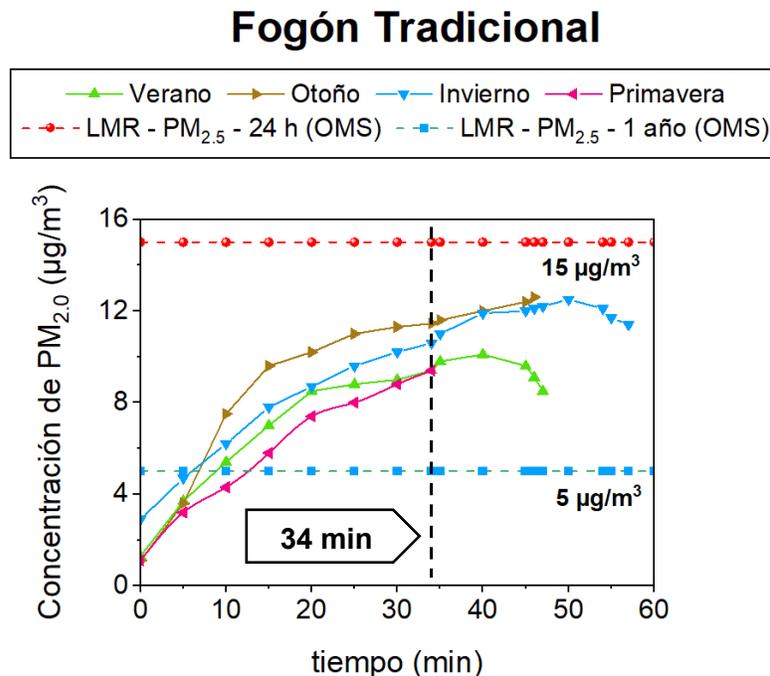


Fig. 4.24 — Emisiones intramuros promedio de material particulado fino (PM<sub>2.0</sub>) al emplear el fogón tradicional durante cada temporada del año

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 4.24, se observa que la concentración intramuros del  $PM_{2.0}$  generada durante el uso de la tecnología tradicional superó, en todos los periodos evaluados, el límite de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la OMS para una exposición máxima de un año, dado que el contacto con niveles más elevados durante periodos prolongados puede ser perjudicial para la salud de los usuarios. Asimismo, se incluyó como referencia el límite de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (LMR- $PM_{2.5-24}$  h) correspondiente al valor máximo establecido para 24 h.

Analizando la gráfica anterior, se observa que la concentración del  $PM_{2.0}$  al emplear el fogón mostró un incremento gradual a lo largo de las tareas de cocción. En este sentido, se registró una concentración en verano que superó hasta en un 102 % el límite recomendado para un período de un año, esta misma tendencia se observó en las estaciones de otoño (152 %), invierno (150 %) y primavera (88 %). Contrario a lo anterior, estos valores se mantuvieron entre un 16 % (en otoño) y un 37.3 % (en primavera) por debajo del límite de 24 h. Por otro lado, al comparar las concentraciones registradas durante cada temporada durante un mismo lapso de 34 minutos, se identificó la máxima concentración durante la temporada de otoño ( $11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), seguida por el invierno ( $10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), primavera ( $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y verano ( $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Esta variabilidad puede atribuirse a las condiciones climáticas y las propiedades del combustible, entre las que destaca el contenido de cenizas presente en la leña, como se señala en los trabajos de Geronimo C., Meier F. y colaboradores [140, 141]. Por último, se concluye que los valores registrados se encuentran dentro del rango reportado por Semmens E. y colaboradores, lo que sustenta la validez de los resultados obtenidos [150].

Por otra parte, la Figura 4.25 presenta una estimación de la concentración intramuros de  $PM_{2.0}$  generada al utilizar la estufa Vilma en cada estación del año, durante las cuales se registraron las concentraciones máximas y promedios siguientes:

- **Verano:**  $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- **Otoño:**  $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- **Invierno:**  $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- **Primavera:**  $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Estufa Vilma

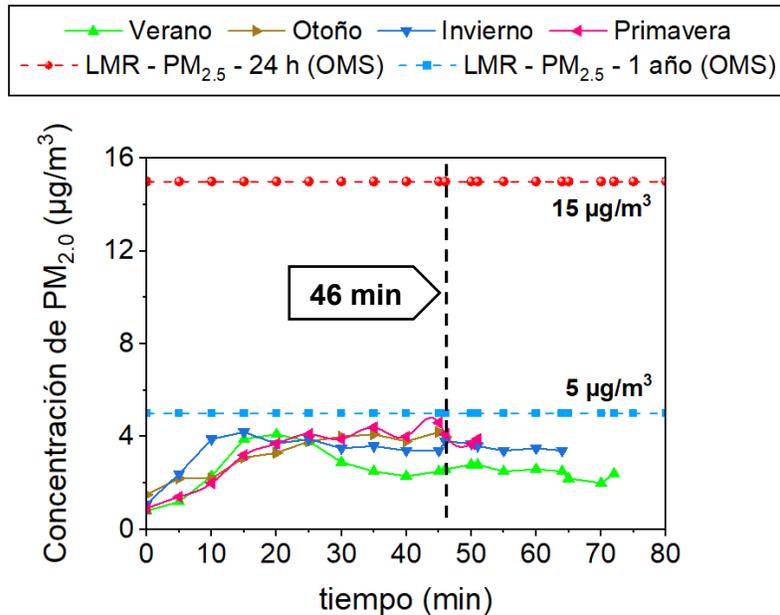


Fig. 4.25 — Emisiones intramuros promedio de material particulado fino ( $PM_{2.0}$ ) al emplear la estufa Vilma durante cada época del año.

De la Figura 4.25, se observa que las concentraciones de  $PM_{2.0}$  generadas al utilizar la estufa Vilma se mantuvieron en un rango considerado seguro, sin exceder los límites recomendados por la OMS. Los datos recopilados revelaron que, durante el verano, la concentración máxima registrada fue un 17.6 % inferior al valor límite recomendado anualmente, de la misma forma, en otoño e invierno se ubicaron un 16 % por debajo del mismo límite, y un 8 % en primavera. Además, todos estos valores estuvieron entre un 69.3 % y un 72.5 % por debajo del límite establecido para 15 minutos.

Al relacionar las Figuras 4.24 y 4.25, se determinó que el uso de la estufa mejorada permitió reducir entre un 55 % (primavera) y un 66.6 % (otoño) la concentración máxima de  $PM_{2.0}$  alcanzada con el fogón tradicional durante los periodos evaluados. Adicionalmente, se analizaron los datos correspondientes al mismo intervalo de 46 minutos utilizado para el CO y el  $CO_2$ , en los cuales se identificaron los siguientes valores máximos:  $4.1 \mu g/m^3$  en primavera,  $4 \mu g/m^3$  en otoño,  $3.8 \mu g/m^3$  en invierno y  $2.6 \mu g/m^3$  en verano. Dichas emisiones superaron en un 96 % las reportadas por Arreola C. en pruebas de laboratorio, sin embargo, no rebasaron los límites recomendados por la OMS [25]. Por otra parte, considerando lo

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

estipulado en la Norma Boliviana NB-83001 (anexo B) se obtuvo una disminución del 61.6 % en la concentración relativa, lo que indica que el dispositivo aún requiere mejoras para cumplir con los estándares requeridos para su implementación en comunidades rurales [119].

### 4.3.4. Impacto económico

El análisis del impacto económico permitió determinar el costo asociado al consumo de combustible y a la elaboración del prototipo. Asimismo, este estudio facilitó la estimación del ahorro económico anual generado al utilizar la tecnología mejorada en comparación con el modelo tradicional, así como el tiempo necesario para recuperar la inversión destinada a la construcción de la estufa Vilma. Para este caso de estudio, se empleó una metodología basada en la propuesta de Zavala López [121]. En tal sentido, se consideró el precio promedio del triciclo de leña de espina blanca durante los últimos cinco años, como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 — Precio de los últimos 5 años del de combustible.

Período	Precio del triciclo de combustible (MXN)	Incremento anual en el precio (%)
2020	150	0
2021	200	33.3
2022	200	0
2023	250	25
2024	250	0
<b>Promedio</b>	<b>210</b>	<b>11.67</b>

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla anterior, el precio del triciclo de combustible registró un incremento del 66.6 % en el período comprendido entre 2020 y 2024, lo que representa un aumento promedio anual ( $IPA_{comb}$ ) del 11.67 %. En relación con el intervalo evaluado, el costo se mantuvo constante en 250 MXN por período, tal como se muestra en la Tabla 4.4.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 4.4 — Costo y masa combustible adquirida en cada temporada evaluada.

Temporada	Costo del del triciclo de combustible (MXN)	Masa total del lote de combustible (kg)	Costo equivalente del kg de combustible (MXN)
Verano	<b>250</b>	74.5	3.36
Otoño		77.6	3.22
Invierno		74.2	3.37
Primavera		73.4	3.41
<b>Promedio</b>		<b>74.9</b>	<b>3.34</b>

En la Tabla 4.4 se presentan el costo del lote, la masa adquirida y el valor equivalente por kilogramo del combustible utilizado durante las evaluaciones realizadas en cada estación del año, así como el promedio de cada uno de estos parámetros. A partir de esta información, se determinó que un triciclo contenía, en promedio, 74.9 kg de leña, con un precio medio de 3.34 MXN por kilogramo ( $\text{CostoP}_{\text{kg}}$ ). Posteriormente, las evaluaciones cuantitativas revelaron el consumo semanal de combustible para la estufa ecológica y el fogón. Con base en estos resultados, se calculó el costo diario del combustible consumido por cada kilogramo de alimento cocinado ( $\text{CostoP}_{\text{comb/kgA}}$ ), como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 — Costo del consumo de combustible estimado por kg de alimento cocinado en cada temporada.

Variable	Costo semanal de combustible empleado (MXN)		Masa de alimentos cocinados semanalmente (kg)		Costo del combustible consumido diariamente por kg de alimento cocinado (MXN/kg)	
	Estufa Vilma	Fogón	Estufa Vilma	Fogón	Estufa Vilma	Fogón
<b>Temporada/Tecnología</b>						
<b>Verano</b>	85.06	89.06	29.42	25.34	2.89	3.51
<b>Otoño</b>	78.37	93.21	24.09	17.08	3.25	5.46
<b>Invierno</b>	82.67	102.11	44.58	31.27	1.85	3.27
<b>Primavera</b>	67.03	69.63	24.24	15.31	2.77	4.55
<b>Total</b>	<b>313.13</b>	<b>354.01</b>	<b>122.33</b>	<b>89.00</b>	<b>10.76</b>	<b>16.79</b>
<b>Promedio</b>	<b>78.28</b>	<b>88.50</b>	<b>30.58</b>	<b>22.25</b>	<b>2.69</b>	<b>4.20</b>

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la Tabla anterior se observa que, al utilizar la tecnología mejorada en comparación con el fogón tradicional, se obtuvo un ahorro promedio estimado diario de 1.51 MXN ( $Ahorro_{P_{diario}}$ ), equivalente al 35.95 %. A partir de este valor, se estimó una reducción del consumo anual equivalente de aproximadamente 549.5 MXN. Considerando lo reportado por la Red Mexicana de Bioenergía<sup>4</sup> y el portal Direct Stoves<sup>5</sup>, se calculó el Valor Presente Neto asociado al uso de la estufa Vilma ( $VPN_{Vilma}$ ), el cual permite medir la rentabilidad del proyecto. Para este análisis, se incorporó el incremento promedio anual en el precio del combustible previamente calculado ( $IP_{comb}$ ), así como una tasa de descuento del 11 % recomendada por el Banco de México (BANXICO), como se muestra en la ecuación 9 [151].

$$\begin{aligned}
 VPN_{Vilma} = & -2,225.2 \text{ MXN} - \frac{549.44 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^1} + \frac{613.54 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^2} \\
 & + \frac{685.12 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^3} + \frac{765.05 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^4} + \dots + \frac{2,575.42 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^{15}}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 9}$$

$$VPN_{Vilma} = 5,520.09 \text{ MXN}$$

A partir de la ecuación 9, se determinó que el uso continuo de la estufa ecológica Vilma, en comparación con el fogón, generaría un ahorro económico aproximado de 5520.1 MXN después de un período de 15 años. Posteriormente, se calculó la Tasa Interna de Retorno ( $TIR_{Vilma}$ ), la cual representa un indicador de la rentabilidad porcentual del proyecto de inversión, como se muestra en la ecuación 10.

$$\begin{aligned}
 VPN_{Vilma} = & -2,225.2 \text{ MXN} - \frac{549.44 \text{ MXN}}{(1 + TIR)^1} + \frac{613.54 \text{ MXN}}{(1 + TIR)^2} \\
 & + \frac{685.12 \text{ MXN}}{(1 + TIR)^3} + \frac{765.05 \text{ MXN}}{(1 + TIR)^4} + \dots + \frac{2,575.42 \text{ MXN}}{(1 + TIR)^{15}} = 0
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 10}$$

---

<sup>4</sup> De acuerdo con la Red Mexicana de Bioenergía los modelos similares a la estufa Vilma tienen una duración estimada de 10 años [6].

<sup>5</sup> Según el proveedor de estufas "Direct Stoves" los dispositivos de cocción que funcionan con leña fabricados de metal, tienen un período de vida útil de entre 10 y 20 años de acuerdo con el mantenimiento realizado [166].

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

$$TIR_{vilma} = 34.91 \%$$

De acuerdo con la ecuación 10, al concluir el plazo establecido se estima una rentabilidad del 34.91 %, lo cual indica que el uso de la estufa permitiría un ahorro equivalente a dicho porcentaje en comparación con la tecnología tradicional. Retomando lo anterior, se procedió a calcular la relación costo-beneficio asociada al uso de la tecnología mejorada ( $C/B_{vilma}$ ), como se presenta en la ecuación 11.

$$C/B_{vilma} = \frac{\frac{549.44 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^1} + \frac{613.54 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^2} + \frac{685.12 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^3} + \frac{765.05 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^4} + \dots + \frac{2,575.42 \text{ MXN}}{(1 + 0.11)^{15}}}{2,225.22 \text{ MXN}} \quad \text{Ec. 11}$$

$$C/B_{vilma} = 3.14 \text{ MXN}$$

De acuerdo con la ecuación 11, al finalizar el período establecido, el uso de la estufa ecológica en comparación con el fogón tradicional generaría un ahorro de 3.14 MXN por cada unidad monetaria invertida en la fabricación del prototipo. Finalmente se elaboró la gráfica de flujo acumulado correspondiente al período analizado, la cual se presenta en la Figura 4.26. Para este caso, se consideró una inversión inicial fija de 2225.22 MXN destinada a la construcción del prototipo de la estufa Vilma y un vida útil estimada de 15 años.

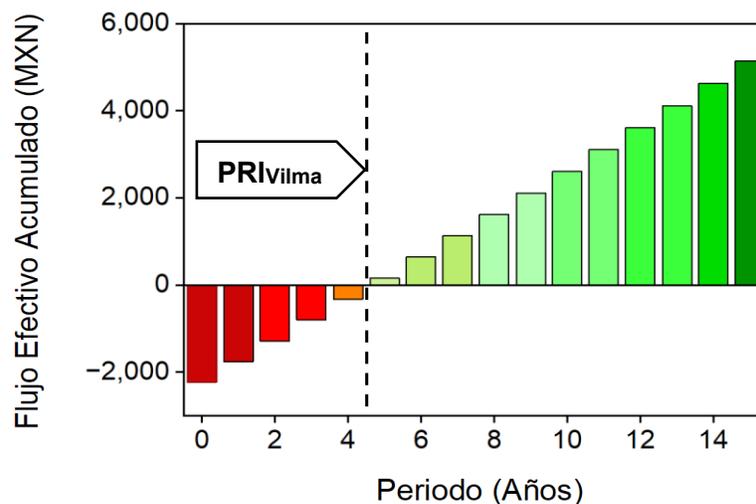


Fig. 4.26 — Flujo acumulado de efectivo durante un período de 15 años.

## CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la Figura 4.26 se aprecia que la inversión destinada a la construcción del prototipo de la estufa Vilma se recuperará en un plazo aproximado de 4 años y 4 meses.

### 4.4. Manual de usuario

El manual de usuario desarrollado, titulado “Estufa ecológica de doble combustión Vilma, componentes, instalación, uso y mantenimiento” tiene por objetivo proporcionar a los usuarios información fundamental sobre las características y funcionalidades del dispositivo, como se muestra en la Figura 4.27. Este documento proporciona las herramientas y conocimientos necesarios para optimizar la eficiencia de operación, garantizar un uso seguro y prolongar su vida útil. Este material está en proceso de publicación.

Para ello, el contenido del manual incluye una descripción detallada de los componentes de la estufa, instrucciones para su correcta instalación y operación, lineamientos para el mantenimiento preventivo y correctivo, así como recomendaciones sobre el manejo adecuado de la leña. Además, busca fomentar el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y mejorar la calidad de vida de los usuarios mediante la reducción de los riesgos asociados a prácticas de cocción tradicionales.

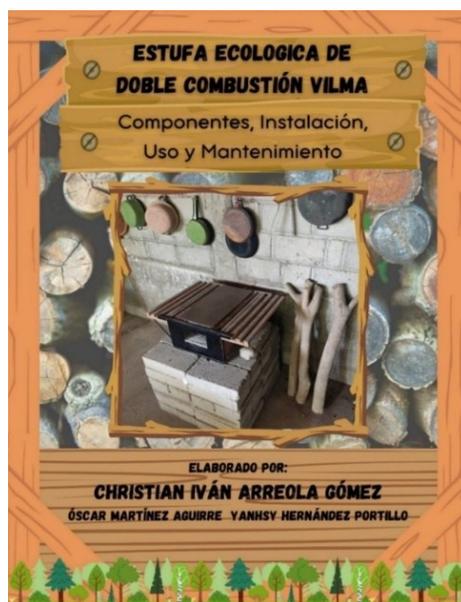


Fig. 4.27 — Portada del manual de usuario de la estufa ecológica Vilma.

## CONCLUSIONES

- El estudio cualitativo, realizado mediante la metodología KPT, reveló que los usuarios de la zona evaluada empleaban de manera combinada gas LP y leña (especies como espina blanca, guamúchil y botoncillo) como fuentes energéticas para la cocción de alimentos. A su vez, el método principal de encendido del fuego consistía en el uso de diversos iniciadores (cartón, cortezas de leña, olote, totomoxtle, papel e incluso diésel) para facilitar el arranque de la combustión, así como el uso de un abanico para forzar la circulación del aire y agua para apagar los extremos con brasas al finalizar el proceso, lo cual dificultaba reutilizar la leña húmeda de forma inmediata.
- Retomando lo anterior, previo a la implementación de la estufa ecológica Vilma, las actividades de cocción se realizaban en diversos dispositivos, siendo el principal una estufa comercial de gas LP, además de un fogón en forma de herradura, un fogón móvil de acero y un horno de barro. No obstante, tras la instalación de la tecnología mejorada, se obtuvo un incremento del 28 % en el uso inicial de biomasa (leña y sus derivados) como combustible, lo que redujo considerablemente la preferencia por el gas LP. Este dato es de gran relevancia, ya que indica que la tecnología implementada fue apropiada y es utilizada preferentemente en comparación con otros dispositivos.
- Las mediciones del consumo de combustible en la estufa Vilma mostraron un ahorro estandarizado del 11.55 % en relación con el fogón tradicional. Paralelamente, el análisis estandarizado arrojó una reducción del 14.3 % en el consumo per cápita anual, equivalente a una mitigación de 80.56 kg de CO<sub>2</sub>e. Dichos valores son similares a los reportados en el estado del arte por Manaye Ashenafi, Awais Junejo, Mark A. Lung, SNV Vietnam y colaboradores [69], [138], [139], [152], lo que respalda la fiabilidad de los resultados obtenidos. No obstante, durante este estudio se identificaron como limitaciones el reducido tamaño de la muestra y el alto contenido de humedad en el combustible empleado.
- Al relacionar el consumo de combustible con la masa de alimentos cocinados, se estimó un ahorro del 35.65 % en el consumo de leña por cada kg de comida cocinada en la estufa Vilma, en comparación con el fogón. Esto representa una reducción per cápita anual de 147.2 kg de combustible y una mitigación de 296.33 kg de CO<sub>2</sub>e por

persona; lo que equivale a que si se utilizaran ambas tecnologías al mismo tiempo durante un año, y las dos iniciaran con la misma reserva de combustible, la estufa Vilma se podría emplear durante un período de 49 días más que el fogón.

- La evaluación de las emisiones intramuros evidenció que la estufa Vilma mantuvo las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub> en niveles seguros para la salud de los usuarios, registrando en su mayoría valores por debajo de los límites recomendados por la OMS y la REHVA. Asimismo, los datos recopilados mostraron reducciones significativas al emplear la tecnología mejorada en comparación con el fogón tradicional, con valores de entre un 97 % y un 100 % para el CO y entre un 55 % y un 66.6 % para el PM<sub>2.0</sub>. En el caso del CO<sub>2</sub> se observaron valores de entre un 19 % y un 29.7 % por debajo del límite de calidad confiable en interiores.
- En cuanto al impacto económico, se estimó que el uso continuo de la estufa ecológica permitiría un ahorro equivalente a 549.44 MXN durante el primer año, en comparación con el fogón. Además, se estima que este ahorro se incrementará anualmente en 11.7 %, de acuerdo con el aumento en el costo del combustible. Por otra parte, se calculó que después de un plazo de 15 años se obtendría una relación costo-beneficio de 3.14 MXN por cada peso invertido en la elaboración del prototipo, así como un período de retorno de la inversión de aproximadamente 4 años y 4 meses.
- El manual desarrollado combina información textual e ilustrativa para facilitar la comprensión y el uso adecuado de la estufa ecológica Vilma. Este documento proporciona a los usuarios las herramientas necesarias para maximizar el rendimiento operativo del dispositivo. Además, incluye instrucciones detalladas sobre los procedimientos para prevenir y corregir desperfectos, así como recomendaciones para el mantenimiento regular, manejo de combustibles y la seguridad durante su uso. De esta manera, no solo se asegura el uso óptimo, sino que también promueve la durabilidad del dispositivo y se reduce la necesidad de asistencia técnica de terceros.

En definitiva, de las pruebas realizadas en la estufa ecológica Vilma y el fogón, se destaca un buen desempeño en la mitigación de emisiones al utilizar la tecnología mejorada de acuerdo con el usuario y el evaluador, ya que esta sostuvo el confort propio de una buena calidad del aire durante la cocción de los alimentos, asimismo, mostró un ahorro en el

consumo de combustible por kilogramo de comida cocinada en relación al fogón, almacenó el calor generado durante periodos prolongados y mantuvo una mayor seguridad durante la operación comparado con el modelo tradicional mencionado. En cuanto al manual de usuario se logró desarrollar un documento que promueve la sostenibilidad del dispositivo, proporcionando a los usuarios las herramientas y los conocimientos necesarios para optimizar su rendimiento y prolongar su vida útil.

Además, el dispositivo desarrollado contribuye al cumplimiento de varios de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) promovidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), tales como el ODS 3 (Salud y bienestar) al reducir la exposición al humo nocivo; el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al promover el uso eficiente de la biomasa; el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al fomentar prácticas sostenibles; y el ODS 13 (Acción por el clima), al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Pine, R. Edwards, O. Maser, A. Schilman, A. Marrón-Mares, y H. Riojas-Rodríguez, “Adoption and use of improved biomass stoves in Rural Mexico”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, núm. 2, pp. 176–183, jun. 2011, doi: 10.1016/j.esd.2011.04.001.
- [2] F. A. Manzano, R. A. Abeldaño Zuñiga, y G. N. de Lima, “Use of Biomass Fuels for Cooking and Improved Biomass Stoves in Mexico”, 2022, pp. 625–639. doi: 10.1007/978-3-030-86304-3\_37.
- [3] Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE), “Estufas Ahorradoras de Leña para el Hogar Rural: Validación y Construcción”, Turrialba, ene. 1994. Consultado: el 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1897>
- [4] M. A. Vázquez Calvo, A. Cruz León, C. Santos Cervantes, M. Á. Pérez Torres, y D. Ma. Sangerman Jarquín, “Estufas lorena: uso de leña y conservación de la vegetación”, *Rev Mex De Cienc Agric*, jun. 2016.
- [5] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “Estufas ecológicas ahorradoras con chimenea, beneficio ambiental y de salud para la población”, Gobierno de México.
- [6] Red Mexicana de Bioenergía, “Estufas Eficientes”, Estufas eficientes. Consultado: el 25 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rembio.org.mx/estufas-eficientes/#1684875693221-91683dca-b90f>
- [7] V. Berrueta, “Características del mercado de estufas de biomasa en México”, 2011. Consultado: el 20 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Berrueta-2011.-Caracter--sticas-del-mercado-de-estufas-de-biomasa-en-M--xico.-Taller-sobre-uso-de-biomasa-para-la-coccion-en-hogares-mexicanos.-.pdf>
- [8] L. M. Jiménez Romo, “Apropiación, uso y adaptación de las Estufas Ahorradoras de Leña en Amatenango del Valle.”, Tesis, El Colegio de la Frontera Sur Unidad San Cristóbal de las Casas, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, 2016.
- [9] I. M. Ríos Badrán, J. Santos Cruz, y C. Gutiérrez Antonio, “Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global”, *Ciencia*, vol. 68, núm. 4, pp. 1–7, 2017.
- [10] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2023”. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- [11] J. Arauzo, F. Bimbela, J. Ábrego, J. L. Sánchez, y A. Gonzalo, “Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa”, *Boletín del Grupo Español del Carbón*, pp.

- 2–6, septiembre de 2014. Consultado: el 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/108763>
- [12] B. Velázquez Martí, *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*, 1a ed., vol. 1. Valencia, 2018. Consultado: el 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/113122>
- [13] Portal Académico del Colegio de Ciencias y Humanidades - UNAM, “Combustión ¿Qué es?” Consultado: el 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad2/combustion/quees>
- [14] J. A. Pagador Becerra, “Cambios químicos: combustión”, Ciencias Naturales 5° de Educación Primaria Colección “Itinerarios didácticos”.
- [15] International Energy Agency (IEA), “Renewables 2024”, IEA. Consultado: el 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- [16] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), “El humo de la leña y su salud”, EPA. Consultado: el 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- [17] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Contaminación del aire doméstico y salud”, OMS. Consultado: el 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- [18] L. Huerta Mendoza, “¿Por qué es peligroso cocinar con fogones a leña?”, *UNAM Revista Global*, Ciudad de México, el 29 de marzo de 2023. Consultado: el 21 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://unamglobal.unam.mx/global\\_revista/por-que-es-peligroso-cocinar-con-fogones-a-leña/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20en,isqu%C3%A9mica%20y%20c%C3%A1ncer%20de%20pulm%C3%B3n.](https://unamglobal.unam.mx/global_revista/por-que-es-peligroso-cocinar-con-fogones-a-leña/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20en,isqu%C3%A9mica%20y%20c%C3%A1ncer%20de%20pulm%C3%B3n.)
- [19] O. Masera *et al.*, “Vulnerabilidad a COVID-19 en poblaciones rurales y periurbanas por el uso doméstico de leña”, *Instituto Nacional de Salud Pública*, may 2020, Consultado: el 20 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.insp.mx/avisos/5386-vulnerabilidad-covid-19-poblaciones-rurales.html>
- [20] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)”, 2018. Consultado: el 20 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/#Documentacion>
- [21] Secretaría de Energía (SENER), “Balance Nacional de Energía 2023”, Ciudad de México, feb. 2025. Consultado: el 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>

- [22] M. E. Álvarez Sánchez y A. Vázquez Alarcón, *Agroforestería para la Conservación de los Recursos Naturales y Productividad YA*, 1.ª., vol. 1. Texcoco: Universidad Autónoma de Chapingo, 2018.
- [23] J. A. Ortiz Moreno, O. R. Masera Cerutti, y A. F. Fuentes Gutiérrez, *La Ecotecnología en México*, 1a ed., vol. 1. Morelia, Michoacán: Imagia Comunicación. Por características tipográficas y diseño editorial, 2014.
- [24] O. Martínez Aguirre, “Desarrollo de un laboratorio y una metodología para la evaluación de estufas ecológicas”, Tesis de Maestría, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, 2016.
- [25] C. I. Arreola Gómez, “Evaluación de una estufa ecológica de doble combustión implementando protocolos internacionales y locales”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, 2022.
- [26] C. Martínez Pulido, “¿Cuándo empezó la humanidad a usar el fuego? - Mujeres con Ciencia”, Ciencia y Más.
- [27] C. W. Lewis, “Biomass through the ages”, *Biomass*, vol. 1, núm. 1, pp. 5–15, sep. 1981, doi: 10.1016/0144-4565(81)90011-1.
- [28] A. Romero Salvador, “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles”, *Departamento de Ingeniería Química, Real Academia de Ciencias Exactas, Universidad Complutense de Madrid, Físicas y Naturales*, vol. 104, núm. 2, Madrid, España, pp. 331–345, 2010. Consultado: el 5 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- [29] Skyline Energy, “Skyline Energy”, The history and technology of biogas: All About Biogas, Article #2.
- [30] F. Kaiser, F. Bas, y A. Gronauer, “Producción de Biogás a partir de Guano Animal: el Caso de Alemania”, *Agronomía Forestal UC*, pp. 4–8, jul. 2002.
- [31] P. J. Meynell, *Methane: Planning a Digester*, 1a ed., vol. 1. New York, 1976.
- [32] “PennState Extension”, A Short History of Anaerobic Digestion.
- [33] E. Salinas Callejas y V. Gasca Quezada, “Los biocombustibles”, *El Cotidiano*, Distrito Federal, México, pp. 75–82, septiembre de 2009.
- [34] C. Gustafson, “History of Ethanol Production and Policy”, North Dakota State University. Consultado: el 12 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ag.ndsu.edu/energy/biofuels/energy-briefs/history-of-ethanol-production-and-policy>

- [35] Lee Enterprises Consulting, "Introduction: History of Biofuel Technology", Lee Enterprises Consulting. Consultado: el 12 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://lee-enterprises.com/a-short-history-of-biofuels/>
- [36] C. Álvarez Maciel, "Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional", *Economía Informa*, agosto de 2009.
- [37] B. Kovarik, "Henry Ford, Charles Kettering and the fuel of the future", Environmental history Timeline and historical insights. Consultado: el 12 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://environmentalhistory.org/people/henry-ford-charles-kettering-and-the-fuel-of-the-future/>
- [38] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Biomasa, creación ecológica de energía", Gobierno de México. Consultado: el 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biomasa-creacion-ecologica-de-energia#:~:text=La%20biomasa%20fue%20la%20fuente,a%20la%20inminente%20crisis%20petrolera.>
- [39] K. Hunt, "CNN DIGITAL", Clues at ancient lake site reveal earliest known cooked meal. Consultado: el 6 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://edition.cnn.com/2022/11/14/world/earliest-evidence-of-cooking-with-fire-scn/index.html#:~:text=Scientists%20have%20found%20the%20earliest,at%20least%20780%2C000%20years%20ago.>
- [40] I. Michael, "New Atlas", Earliest evidence of humans cooking with fire dates back 780,000 years.
- [41] F. Berna *et al.*, "Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, núm. 20, may 2012, doi: 10.1073/pnas.1117620109.
- [42] B. Westhoff, D. Germann, P. Navarro Torrecillas, M. Duffner, y StolzDesign, *Estufas en Imágenes*, 1a ed., vol. 1. 1995.
- [43] E. N. Anderson, *Understanding Food and Culture, Second Edition*, 1a ed. NYU Press, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/j.ctt9qfm0f>
- [44] S. Taranto *et al.*, "Unveiling the culinary tradition of 'focaccia' in Late Neolithic Mesopotamia by way of the integration of use-wear, phytolith & organic-residue analyses", *Sci Rep*, vol. 14, núm. 1, p. 26805, nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78019-9.
- [45] Elmira Stove Works, "A través del fuego: orígenes e historia de la estufa de leña". Consultado: el 6 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://elmirastoveworks.com/through-the-fire-origins-and-history-of-the-woodburning-cookstove/#:~:text=Focusing%20the%20flames&text=The%20first%20woodburning%20cookstove%20patent,to%20the%20expense%20of%20materials.>

- [46] Regional wood energy development programme in asia Gcp/ras/154/net, “Improved solid biomass burning cookstoves: A development manual”, Bangkok, Thailand, 1993.
- [47] Volunteers in Technical Assistance (VITA), “Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves”, Washington DC, dic. 1985.
- [48] R. Bailis, K. R. Smith, y R. Edwards, “Kitchen Performance Test (KPT)”, octubre de 2004, *University of California Berkeley, Berkeley*.
- [49] R. Bailis, K. R. Smith, y R. Edwards, “Kitchen Performance Test (KPT)”, Clean Cooking Alliance Protocols.
- [50] R. Bailis, R. Thompson, V. Berrueta, G. Muhwezi, y E. Adams, “Kitchen Performance Test (KPT)”, Clean Cooking Alliance Protocols. Consultado: el 14 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cleancooking.org/research-evidence-learning/standards-testing/protocols/>
- [51] M. F. Chagunda, C. Kamunda, J. Mlatho, C. Mikeka, y L. Palamuleni, “Performance assessment of an improved cook stove (Esperanza) in a typical domestic setting: implications for energy saving”, *Energy Sustain Soc*, vol. 7, núm. 1, p. 19, dic. 2017, doi: 10.1186/s13705-017-0124-1.
- [52] B. Gizachew y M. Tolera, “Adoption and kitchen performance test of improved cook stove in the Bale Eco-Region of Ethiopia”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 45, pp. 186–189, ago. 2018, doi: 10.1016/j.esd.2018.07.002.
- [53] H. Abera Teka, “The potential of improved cook stoves in fuel wood saving and carbon dioxide emission reduction: the case of sayo woreda, oromia, western Ethiopia.”, Tesis de Grado, Hawassa University, 2019.
- [54] B. Oula Muok y C. Ochia Olweny, “Assessment of Improved Cookstoves and Its Implication on Energy Saving and Environmental Protection in Kisumu County, Kenya”, *International Journal of Sustainable and Green Energy*, vol. 9, núm. 2, p. 38, 2020, doi: 10.11648/j.ijrse.20200902.13.
- [55] M. Fekadu, Z. Mekonnen, y M. Tesfaye, “Comparison of kitchen performance test on firewood consumption and emission of improved mirt and traditional three stone open cook stoves in Amaya, and Bure districts of Ethiopia”, *Climate Change*, vol. 7, núm. 23, pp. 1–10, ene. 2021, Consultado: el 27 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/348004614\\_Comparison\\_of\\_kitchen\\_performance\\_test\\_on\\_firewood\\_consumption\\_and\\_emission\\_of\\_improved\\_mirt\\_and\\_traditional\\_three\\_stone\\_open\\_cook\\_stoves\\_in\\_Amaya\\_and\\_Bure\\_districts\\_of\\_Ethiopia](https://www.researchgate.net/publication/348004614_Comparison_of_kitchen_performance_test_on_firewood_consumption_and_emission_of_improved_mirt_and_traditional_three_stone_open_cook_stoves_in_Amaya_and_Bure_districts_of_Ethiopia)
- [56] M. Fekadu Kedir, T. Bekele, y S. Feleke, “Problems of Mirt, and potentials of improved Gonzie and traditional open cook stoves in biomass consumption and end use emission in

rural wooden houses of Southern Ethiopia”, *Sci Afr*, vol. 3, p. e00064, may 2019, doi: 10.1016/j.sciaf.2019.e00064.

- [57] A. Manaye, S. Amaha, Y. Gufi, B. Tesfamariam, A. Worku, y H. Abrha, “Fuelwood use and carbon emission reduction of improved biomass cookstoves: evidence from kitchen performance tests in Tigray, Ethiopia”, *Energy Sustain Soc*, vol. 12, núm. 1, p. 28, dic. 2022, doi: 10.1186/s13705-022-00355-3.
- [58] C. Munini Munyao, G. K. Kipkorir K, C. Odinga, y G. Simiyu Muse, “Assessment of Improved Biomass Cookstove Technologies and Kitchen Characteristics on Indoor Air Quality and Fuel Consumption in Rural Settings of Western, Kenya”, *European Journal of Health Sciences*, vol. 7, núm. 5, pp. 58–83, 2022.
- [59] M. T. Sotelo, “Alcances ambientales de la adopción de la estufa ahorradora de leña Tlecalli en dos comunidades rurales del Estado de Morelos, México”, *Ambiente y Desarrollo*, vol. 20, núm. 39, p. 143, dic. 2016, doi: 10.11144/Javeriana.ayd20-39.aaae.
- [60] N. M. Fragoso Estevez, “Uso de estufas mejoradas de leña y su impacto en la salud de niños menores de 5 años en San Luis Potosí, 2015”.
- [61] A. Schilman *et al.*, “A follow-up study after an improved cookstove intervention in rural Mexico: Estimation of household energy use and chronic PM2.5 exposure”, *Environ Int*, vol. 131, p. 105013, oct. 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.105013.
- [62] M. Bello-Román, A. García-Flores, H. Colín-Bahena, E. Román-Montes de Oca, y L. Beltrán-Rodríguez, “Variación en el consumo de leña y factores que lo determinan en una comunidad campesina al suroeste del estado de Morelos, México”, *Bot Sci*, vol. 101, núm. 1, pp. 149–163, dic. 2022, doi: 10.17129/botsci.3147.
- [63] L. del R. Ramírez Rodas, “Construcción, implementación y evaluación de una estufa ahorradora de leña”, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, 2014.
- [64] Santander Universidades, “Consecuencias de la deforestación: conoce uno de los fenómenos que más afecta al cambio climático”. Consultado: el 20 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.becas-santander.com/es/blog/consecuencias-de-la-deforestacion.html>
- [65] G. Vázquez, “Culinaria Mexicana”, Estos son los riesgos de cocinar con leña y carbón. Consultado: el 20 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.culinariamexicana.com.mx/lena-y-carbon/>
- [66] V. M. Ruiz García, O. Masera Cerutti, y V. M. Berrueta Soriano, *Manual de buenas prácticas para la implementación de proyectos de estufas ecológicas de leña*, 1a ed., vol. 1. El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), 2023. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://conahcyt.mx/publicaciones-conacyt/manual-de-estufas-ecologicas/>

- [67] V. M. Berrueta Soriano, “Protocolo para evaluación de consumo de leña en hogares rurales (Aplicación del Kitchen Performance Test)”, el 14 de mayo de 2014, *Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable A. C. (GIRA)*.
- [68] N. Farrera Vázquez, J. Moreira Acosta, O. Martínez Aguirre, y O. Lastres Danguillecourt, “Desarrollo y transferencia tecnológica de una estufa ecológica de alta eficiencia y peso ligero”, *Revista Pakbal*, ago. 2020.
- [69] SNV Vietnam y Sun24, “Kitchen Performance Test Rock Bed Stove versus Open Fire SNV Vietnam For Sun24”, Khách Sạn La Thành, Vietnam, jun. 2019.
- [70] Clean Cooking Alliance, “Protocols”, Water Boiling Test, Controlled Cooking Test & Biomass stove safety protocol.
- [71] U.S. Energy Information Administration (EIA), “Biomass—renewable energy from plants and animals”, U.S. Energy Information Administration (EIA). Consultado: el 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
- [72] Bioenergy Technologies Office, “Biomass Resources”, Bioenergy Technologies Office. Consultado: el 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biomass-resources>
- [73] A. I. de Lucas Herguedas, C. del Peso Taranco, E. Rodríguez García, y P. Prieto Paniagua, “Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad”, 2012, *Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, Valladolid*.
- [74] A. Tursi, “A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion”, *Biofuel Research Journal*, vol. 6, núm. 2, pp. 962–979, jun. 2019, doi: 10.18331/BRJ2019.6.2.3.
- [75] G. P. Romanelli, D. M. Ruiz, y G. A. Pasquale, *Química de la biomasa y los biocombustibles*, vol. 1. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, 2015.
- [76] C. L. Williams, R. M. Emerson, y J. S. Tumuluru, “Biomass Compositional Analysis for Conversion to Renewable Fuels and Chemicals”, en *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*, InTech, 2017. doi: 10.5772/65777.
- [77] NIST Chemistry WebBook, “Heat Values of Various Fuels”, World Nuclear Association. Consultado: el 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx#:~:text=The%20heat%20value%20of%20a,specified%20amount%20\(e.g.%20kilograms\).](https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx#:~:text=The%20heat%20value%20of%20a,specified%20amount%20(e.g.%20kilograms).)
- [78] D. Ciolkosz, “Characteristics of Biomass as a Heating Fuel”, *PennState Extension*, Pennsylvania, el 2 de marzo de 2010.

- [79] P. Basu, “Torrefaction”, en *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, Elsevier, 2018, pp. 93–154. doi: 10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2.
- [80] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *Terminología unificada sobre bioenergía*, 1a ed., vol. 1. 2004.
- [81] E. Martines L. y Lira C. Leonel, “Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos”, *Centro Nacional de Metrología (CENAM)*, Municipio el Marqués, Querétaro, pp. 1–6, el 27 de octubre de 2010.
- [82] “La leña: el combustible para calefacción más usado en Los Ángeles, pero menos eficiente y más contaminante, incluso seca”, Ministerio del medio ambiente. Consultado: el 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://mma.gob.cl/la-lena-el-combustible-para-calefaccion-mas-usado-en-los-angeles-pero-menos-eficiente-y-mas-contaminante-incluso-seca/#:~:text=A%20mayor%20contenido%20de%20humedad,su%20uso%20como%20combustible%20s%C3%B3lido>.
- [83] P. Basu, “Biomass Characteristics”, en *Biomass Gasification Design Handbook*, Elsevier, 2010, pp. 27–63. doi: 10.1016/B978-0-12-374988-8.00002-7.
- [84] Unidad de Biomasa - CIEFAP, “Info #1 Laboratorio de Biomasa Unidad de Biomasa”, Esquel, Chubut, Argentina.
- [85] Bioenergy Technologies Office, “Bioenergy Basics”, The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Consultado: el 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-basics>
- [86] Steamax, “Biomass Conversion Technologies”. Consultado: el 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://steamaxindia.com/biomass-conversion-technologies/>
- [87] L. Rani *et al.*, “Recent advances in the production of renewable biofuels using microalgae”, en *Artificial Intelligence for Renewable Energy Systems*, Elsevier, 2022, pp. 173–187. doi: 10.1016/B978-0-323-90396-7.00012-2.
- [88] N. Sadhwani, Z. Liu, M. R. Eden, y S. Adhikari, “Simulation, Analysis, and Assessment of CO<sub>2</sub> Enhanced Biomass Gasification”, 2013, pp. 421–426. doi: 10.1016/B978-0-444-63234-0.50071-3.
- [89] T. Arlete, S. Ozkan, A. P. Ribeiro, A. F. Cristino, y R. Galhano dos Santos, “Thermochemical liquefaction of biomass with ionic liquids: Exploring a sustainable pathway for a cleaner bio-oils production”, *J Clean Prod*, vol. 434, p. 140114, ene. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140114.

- [90] Y. Wang y J. J. Wu, “Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, p. 113754, nov. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113754.
- [91] L. S. Paraschiv, A. Serban, y S. Paraschiv, “Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition”, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 36–45, feb. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.10.016.
- [92] J. C. Wong González y M. de L. Villers Ruiz, “Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche”, *Investigaciones geográficas*, vol. 1, ene. 2007.
- [93] C. A. Carlos A. Franco-Salinas, G. Castillo-Acosta, M. de los A. Monroy Pantaleón, O. Montaña Contreras, y U. Villamil Contreras, “Combustión, combustibles y tipos de combustibles”, *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, vol. 10, núm. 20, pp. 23–25, jul. 2023, doi: 10.29057/estr.v10i20.10738.
- [94] S. R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, 3rd edition. McGraw Hill, 2011. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://faculty.kashanu.ac.ir/file/download/course/65d06dfdd640d-stephen-r.-turns-an-introduction-to-combustion-concepts-and-applications-mcgraw-hill-2012-3ed.pdf>
- [95] D. Ribeiro, “Comburente”, *Revista de Ciência Elementar*, vol. 2, núm. 3, oct. 2014, doi: 10.24927/rce2014.231.
- [96] J. G. Speight, “Combustion of Hydrocarbons”, en *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, Elsevier, 2011, pp. 355–393. doi: 10.1016/B978-0-7506-8632-7.10010-6.
- [97] A. A. Abuelnuor Abuelnuor *et al.*, “Characteristics of biomass in flameless combustion: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 363–370, may 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.079.
- [98] T. Nussbaumer, “Wood Combustion”, en *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1993, pp. 575–589. doi: 10.1007/978-94-011-1336-6\_44.
- [99] T. Seidel, J. Orasche, H. Ruppert, J. Schnelle-Kreis, y H. Hartmann, “Emissions of Organic and Inorganic Pollutants During the Combustion of Wood, Straw and Biogas”, en *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 387–422. doi: 10.1007/978-94-007-6642-6\_13.
- [100] A. I. Calvo *et al.*, “Residential wood combustion in two domestic devices: Relationship of different parameters throughout the combustion cycle”, *Atmos Environ*, vol. 116, pp. 72–82, sep. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.06.012.

- [101] National Aeronautics and Space Administration - NASA, "POWER Data Access Viewer", Prediction Of Worldwide Energy Resource.
- [102] E. D. Vicente *et al.*, "Impact of wood combustion on indoor air quality", *Science of The Total Environment*, vol. 705, p. 135769, feb. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135769.
- [103] K. Rumchev, J. T. Spickett, H. L. Brown, y B. Mkhweli, "Indoor air pollution from biomass combustion and respiratory symptoms of women and children in a Zimbabwean village", *Indoor Air*, vol. 0, núm. 0, nov. 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00494.x.
- [104] T. Kirch, C. H. Birzer, P. R. Medwell, y L. Holden, "The role of primary and secondary air on wood combustion in cookstoves", *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 37, núm. 3, pp. 268–277, mar. 2018, doi: 10.1080/14786451.2016.1166110.
- [105] R. Taylor, "Wood-Burning Stoves", *University of Idaho Extension Forestry Information Series, Moscow, Idaho*. Consultado: el 13 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.uidaho.edu/-/media/Idaho-Responsive/Files/Extension/topic/forestry/WFS1-Wood-Burning-Stoves.pdf>
- [106] A. M. Briones, S. Som, y S. Aggarwal, "Effect of multistage combustion on NO<sub>x</sub> emissions in methane–air flames", *Combust Flame*, vol. 149, núm. 4, pp. 448–462, jun. 2007, doi: 10.1016/j.combustflame.2007.01.007.
- [107] H. Khodaei, F. Guzzomi, D. Patiño, B. Rashidian, y G. H. Yeoh, "Air staging strategies in biomass combustion-gaseous and particulate emission reduction potentials", *Fuel Processing Technology*, vol. 157, pp. 29–41, mar. 2017, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.11.007.
- [108] E. y M. Ministerio de la Industria, Ministerio de Ambiente, y A. y P. Ministerio de Ganadería, *Mejor Leña al Fuego: Manual para el uso responsable de la leña*, 1a ed., vol. 1. Montevideo, Uruguay, 2021.
- [109] T. Chen *et al.*, "Investigations on combustion optimization and NO<sub>x</sub> reduction of a 600-MWe down-fired boiler: Influence of rearrangement of tertiary air and jet angle of secondary air and separated over-fire air", *J Clean Prod*, vol. 277, p. 124310, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124310.
- [110] R. Ruan *et al.*, "Effects of secondary and tertiary air on reducing fine mode particles and NO during gasification-combustion of coal in a self-sustained furnace", *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 187, pp. 292–304, jul. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.04.140.
- [111] T. Urmee y S. Gyamfi, "A review of improved Cookstove technologies and programs", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 625–635, may 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.019.

- [112] S. A. Mehetre, N. L. Panwar, D. Sharma, y H. Kumar, “Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 672–687, jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.150.
- [113] A. L. Quintero Romanillo, E. Lara Ponce, y R. C. Barreras Fitch, “Ecotecnia ‘Estufa Lorena’”, 2017, *Universidad Autónoma Intercultural de Sinaloa, El Fuerte, Sinaloa*. Consultado: el 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://patrimoniobiocultural.com/archivos/publicaciones/revistas/Ecotecnia\\_Estufa\\_Lorena.pdf](https://patrimoniobiocultural.com/archivos/publicaciones/revistas/Ecotecnia_Estufa_Lorena.pdf)
- [114] H. Ayerim Tec Tuyub, “Economía, salud e innovación en una estufa ‘Túumben K’óoben’ (Nuevo fogón)”, PPD-MÉXICO Programa de Pequeñas Donaciones del FMAM.
- [115] HELPS International, “ONIL”, Estufas ONIL. Consultado: el 7 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.helpsintl.org/es/onil/>
- [116] EcoZoom Versa, “The cutting edge of rocket stove technology.”, EcoZoom UK. Consultado: el 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ecozoom-uk.myshopify.com/>
- [117] E. A. Reyes Aguilera, I. O. Medina Benavides, y L. L. Rodríguez Tinoco, “Evaluación de cocinas mejoradas tipo CETA híbrida, dentro del marco del programa terrena, en comunidades vulnerables del departamento de Jinotega”, *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano.*, pp. 12–24, agosto de 2015.
- [118] V. M. Berrueta Soriano, “Evaluación energética del desempeño de dispositivos para la cocción con leña”, Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [119] El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), “Norma Boliviana NB 83001 - Cocinas mejoradas - Condiciones técnicas mínimas de instalación, funcionamiento y rendimiento”, el 28 de junio de 2012.
- [120] J. de J. Orozco Meza, *Evaluación financiera de proyectos*, 3a ed. Bogotá, Colombia: Biblioteca Nacional de Colombia, 2013.
- [121] Ó. Zavala López, “Evaluación de un Proyecto de Inversión: Sistema Fotovoltaico Interconectado a la Red 200 kW para una Nave Industrial en Uriangato, Guanajuato.”, 2018, *Facultad de Ingeniería, Ciudad de México*.
- [122] A. Damodaran, *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*, 3rd edition. Wiley, 2012.
- [123] F. Curto, “Investment and valuation”, en *Valuing and Investing in Equities*, Elsevier, 2020, pp. 1–8. doi: 10.1016/B978-0-12-813848-9.00001-7.

- [124] A. Hayes, "Discount Rate Defined: How It's Used by the Fed and in Cash-Flow Analysis", investopedia.com. Consultado: el 18 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/terms/d/discountrate.asp>
- [125] Data México, "San Francisco del Mar". Consultado: el 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/san-francisco-del-mar?fdiTimeSelector=Year#economy>
- [126] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Censo de Población y Vivienda 2020 - Cuestionario ampliado", San Francisco del mar, 2020.
- [127] Battroid, "Archivo:Mexico Oaxaca San Francisco del Mar location map.svg", Mapa de localización del municipio de San Francisco del Mar, Oaxaca, México. Consultado: el 21 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mexico\\_Oaxaca\\_San\\_Francisco\\_del\\_Mar\\_location\\_map.svg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mexico_Oaxaca_San_Francisco_del_Mar_location_map.svg)
- [128] Secretaría del Bienestar, "Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2022 - San Francisco del Mar, Oaxaca", San Francisco del Mar, Oaxaca, 2024. Consultado: el 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/888715/20141SanFranciscoDelMar2024.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/888715/20141SanFranciscoDelMar2024.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [129] M. C. Espinel, A. Bruno, y I. Plasencia, "La comprensión de gráficas de porcentaje de variación en situaciones cotidianas", *Unión - Revista Iberoamericana de educación matemática*, el 15 de diciembre de 2010. Consultado: el 11 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://union.fespm.es/index.php/UNION/article/view/969>
- [130] International Institute of Tropical Forestry, "USDA Forest Service".
- [131] E. Alakangas, "Quality guidelines for wood fuels in Finland VTT-M-04712-15", Jyväskylä, oct. 2015. Consultado: el 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cris.vtt.fi/en/publications/quality-guidelines-for-wood-fuels-in-finland>
- [132] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y Forestry Department, *Criteria and indicators for sustainable woodfuels*, 1a ed., vol. 1. Roma: FAO Forestry Paper, 2010. Consultado: el 27 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/items/db6f206f-0831-43eb-af79-f2bd27cfc1d0>
- [133] National Academy of Sciences, "Firewood Crops Shrub and Tree Species for Energy Production", Washington, D.C., 1980.
- [134] L. Nunes, M. Raposo, C. Meireles, C. Gomes, y N. Ribeiro, "Energy Recovery of Shrub Species as a Path to Reduce the Risk of Occurrence of Rural Fires: A Case Study in Serra da Estrela Natural Park (Portugal)", *Fire*, vol. 4, núm. 3, p. 33, jun. 2021, doi: 10.3390/fire4030033.

- [135] B. G. Tucho, H. F. Etefa, V. Kumar, G. A. Raba, M. T. Efa, y F. B. Dejene, "Effect of wood moisture content on the performance of wood burning cook stoves", *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 16, núm. 1, pp. 1–10, dic. 2023, doi: 10.1080/19397038.2022.2159568.
- [136] Bulcha Gute Tucho, "Comparative study of burning efficiencies of wood of different moisture contents", Haramaya University, Haramaya, Etiopía, 2019.
- [137] D. Wade y J. Lundsford, "La quema como medio de ordenación forestal: El uso de quemas controladas en el sur de los Estados Unidos".
- [138] A. Junejo, S. Kumar, K. Harijan, y M. Jeguirim, "Comparative analysis of fuel wood consumption of improved mud stove and three stone fire stove: a case study", *Comptes Rendus. Chimie*, vol. 26, núm. S1, pp. 1–11, jul. 2023, doi: 10.5802/crchim.235.
- [139] M. A. Lung y A. Espira, "A large-scale, village-level test of wood consumption patterns in a modified traditional cook stove in Kenya", *Energy for Sustainable Development*, vol. 49, pp. 11–20, abr. 2019, doi: 10.1016/j.esd.2018.12.004.
- [140] C. Geronimo, S. E. Vergara, C. Chamberlin, y K. Fingerman, "Overlooked emissions: Influence of environmental variables on greenhouse gas generation from woody biomass storage", *Fuel*, vol. 319, p. 123839, jul. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123839.
- [141] F. Meier *et al.*, "Influence of Oxygen Availability on off-Gassing Rates of Emissions from Stored Wood Pellets", *Energy & Fuels*, p. acs.energyfuels.5b02130, ene. 2016, doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02130.
- [142] E. D. Vicente *et al.*, "Impact of wood combustion on indoor air quality", *Science of The Total Environment*, vol. 705, p. 135769, feb. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135769.
- [143] S. Adianimovie y G. Ebinimi, "Investigation of Particulate Matter (PM10 & PM2.5) and Gaseous Pollutants (CO2 & CO) in Houses Using Kerosene Cooking Stoves & Wood Fire in Attisa 3, Bayelsa State, Nigeria", *Journal of Science and Technology Research*, vol. 2, jun. 2023, Consultado: el 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://journals.nipes.org/index.php/njstr/article/view/613>
- [144] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), "Resumen de salud pública - Monóxido de Carbono", 2012. [En línea]. Disponible en: [www.atsdr.cdc.gov/es](http://www.atsdr.cdc.gov/es)
- [145] Mayo Clinic, "Carbon monoxide poisoning", Mayo Clinic. Consultado: el 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/carbon-monoxide/symptoms-causes/syc-20370642>
- [146] R. P. Padilla y A. Schilman, "Uso de leña en el hogar Riesgos a la salud, situación actual y alternativas".

- [147] U.S. Environmental Protection Agency, “Household Energy and Clean Cookstove Research”. Consultado: el 9 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-research/household-energy-and-clean-cookstove-research>
- [148] P. R. Zavaleta Castellón, “Análisis de impactos productivos y ambientales de la implementación de ventiladores y cambio de combustible en ladrilleras artesanales de Riberalta, Beni.”, *SciELO-Bolivia*, 2018.
- [149] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), “Emisiones de dióxido de carbono”, Emisiones de dióxido de carbono. Consultado: el 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- [150] E. O. Semmens, C. W. Noonan, R. W. Allen, E. C. Weiler, y T. J. Ward, “Indoor particulate matter in rural, wood stove heated homes”, *Environ Res*, vol. 138, pp. 93–100, abr. 2015, doi: 10.1016/j.envres.2015.02.005.
- [151] Banco de México, “Banco de México (BANXICO)”, Política Monetaria. Consultado: el 25 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.banxico.org.mx/>
- [152] A. Manaye, S. Amaha, Y. Gufi, B. Tesfamariam, A. Worku, y H. Abrha, “Fuelwood use and carbon emission reduction of improved biomass cookstoves: evidence from kitchen performance tests in Tigray, Ethiopia”, *Energy Sustain Soc*, vol. 12, núm. 1, p. 28, dic. 2022, doi: 10.1186/s13705-022-00355-3.
- [153] R. Díaz Jiménez, “Asistencia técnica sobre lecciones aprendidas y recomendaciones para el desarrollo de proyectos de estufas eficientes en Guatemala, el Salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá.”, 2010. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0172.pdf>
- [154] R. Díaz Jiménez, V. M. Berrueta Soriano, y O. Masera, “De la ‘Lorena’ a la ‘Patsari’: Proceso de Mejoramiento e Innovación de Tecnología Rural”, noviembre de 2004, *Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)*, *Guanajuato*. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [http://www.bioenergylists.org/estufasdoc/Rodolfo\\_Diaz/DeLorena-a-Patsari.pdf](http://www.bioenergylists.org/estufasdoc/Rodolfo_Diaz/DeLorena-a-Patsari.pdf)
- [155] S. Proust, “Estufa Túumben Kóoben”, Improved Biomass Cooking Stoves. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://stoves.bioenergylists.org/node/2379>
- [156] Primavera Díaz, “Con una estufa que ahorra leña, una mujer mexicana lucha contra el cambio climático”, Naciones Unidas: Noticias ONU Mirada Global Historias Humanas. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2022/03/1505172>

- [157] InfraRural, “Estufa Xalpaneca”, InfraRural. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cihub.mx/infrarural>
- [158] Agencia ID, “Presentan Xalpaneca, estufa ecológica que evita siete toneladas de contaminantes al año”, iNGENET Bitácora. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bitacora.ingenet.com.mx/2015/10/presentan-xalpaneca-estufa-ecologica-que-evita-siete-toneladas-de-contaminantes-al-ano/>
- [159] Ecostufa, “Ecostufa”. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecostufa.com/somos.php>
- [160] Abastecedora Palermo, “Estufa ecológica o estufa ahorradora de leña”. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.abastecedorapalermo.com/>
- [161] F. Miranda, “Van contra el ‘asesino de la cocina’; impulsan estufa ecológica”, *Milenio Ciencia y Salud*, el 4 de agosto de 2020.
- [162] C. Orozco Reséndiz, J. Bolaños Jiménez, A. Moctezuma Mendoza, L. Pérez Manzanera, J. Riquelme Barrios, y J. Vega Hernández, “Manual de construcción: Estufa Ñuu Savi ahorradora de leña y sanitaria”. Consultado: el 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://nuestraraiz.org/wp-content/uploads/2015/12/manual-estufas-final.pdf>
- [163] “Eco Flama”, Grupo Industrial Vallejo. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.superflama.com/eco-flama/>
- [164] Instituto Nacional del Cáncer, “Sustancias químicas en la carne cocinada a altas temperaturas y el riesgo de cáncer”, Instituto Nacional de la Salud (NIH). Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/alimentacion/hoja-informativa-carne-cocinada>
- [165] Agencia Chilena para la Inocuidad y Calidad Alimentaria (ACHIPIA), “Mantención de alimentos a temperaturas altas”, Santiago, Chile, abr. 2024.
- [166] Direct Stoves, “When Is It Time to Replace Your Wood Burning Stove?”, Direct Stoves. Consultado: el 25 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.directstoves.com/our-blog/when-is-it-time-to-replace-your-wood-burning-stove/>

## ANEXOS

### Anexo A: Prueba de funcionamiento en cocina (KPT versión 3.0)

Los recursos humanos, materiales, herramientas y equipos empleados son los siguientes:

- Estufa ecológica Vilma
- Usuario
- Temporizador
- Báscula electrónica (Torrey modelo LEQ-10)
- Medidor de humedad y temperatura (Mestek modelo MW700)

Las especificaciones técnicas de equipos y herramientas se incluyeron en el Anexo C.

### Metodología del protocolo KPT versión 3.0

La KPT tiene dos objetivos principales: (1) evaluar los aspectos cualitativos del desempeño de las estufas mediante encuestas en los hogares y (2) comparar el impacto de las estufas mejoradas sobre el consumo de combustible en las cocinas de hogares reales. Para alcanzar estos objetivos, la KPT incluye encuestas cuantitativas sobre el consumo de combustible y encuestas cualitativas sobre el desempeño y la aceptabilidad de las estufas.

### FASE CUALITATIVA

La evaluación cualitativa sobre la opinión de las personas acerca de las estufas debe realizarse en dos fases.

- **Encuesta previa.** El primer cuestionario tiene por objetivo recabar información social, económica y culinaria sobre las familias y las diversas tecnologías de cocción de alimentos existentes. Asimismo, este busca identificar a los hogares interesados en adoptar una estufa mejorada y participar en la fase cuantitativa de la evaluación. Es importante considerar que esta parte del protocolo debe aplicarse preferiblemente antes de la implementación de estufas mejoradas cuando se desee estudiar su impacto en la cocina.
- **Encuesta de seguimiento.** Este cuestionario tiene como objetivo identificar tanto las fortalezas como las debilidades en el desempeño de las tecnologías mejoradas y tradicionales, así como identificar cualquier cambio en la situación económica o demográfica

del hogar. Es importante remarcar que la aplicación del segundo cuestionario se limita a los hogares que han adoptado una estufa mejorada, preferiblemente de manera pareada, de modo que las encuestas de seguimiento se realicen en hogares que también participaron en la encuesta inicial y debe realizarse al menos un mes después de la implementación del nuevo dispositivo.

### Encuestas cualitativas aplicadas

Tabla A1 — Preguntas de la encuesta previa (KPT).

<b>1. Fecha</b>	02/07/2023	
<b>2. Nombre del entrevistador</b>	Christian Iván Arreola Gómez	
<b>3. Coordenadas</b>	Longitud: 94° 30' 41.04" W Latitud: 16° 20' 11.29"N Altitud: 10 m s. n. m	
<b>4. Indique el sexo y la edad de los miembros de HH (hasta 10 personas):</b>	<b>Genero/Edad</b>	<b>Recuento</b>
	Niños (0-14 años)	0
	Mujeres mayores de 14 años	2
	Hombres (15-59 años)	2
	Hombres mayores de 59 años	0
<b>5. Actividades primarias que generan ingresos (encierre en un círculo)</b>	Solo agricultura	<b>Sí es agricultura, enliste los cultivos:</b>  a) Sorgo b) Maíz c) Mango
	Solo mano de obra asalariada	
	<input checked="" type="checkbox"/> Agricultura y trabajo asalariado	
	Comercio	
	Agricultura y comercio	
Otro:		
<b>6. ¿Quién es el principal responsable de cocinar?</b> Sra. Risela Gómez Mateos	Enliste el sexo y la edad como en la pregunta 4 anterior: Mujeres mayores de 14 años: 1	
<b>7. ¿Se cocina en el interior, al aire libre o en ambos?</b>	En ambos	

8. ¿La cocina está separada de la casa principal?		Sí	
9. ¿Qué tipo de estufa(s) se utilizan? ¿Cuál es la antigüedad y la frecuencia de uso de cada estufa?	<b>Estufa/combustible</b>	<b>Antigüedad de la estufa (años)</b>	<b>Frecuencia de uso (veces por día, semana o mes)</b>
	a) Fogón tipo herradura/Leña	4	5 veces por semana
	b) Fogón de lámina y barro/Leña	4	3 veces por semana
	c) Estufa/GLP	12	12 veces por semana
10. ¿De quién es el trabajo de obtener combustible para cocinar? Sr. Rubén Arreola Pérez	<b>Para cada estufa/combustible de la pregunta 9, enumere el sexo y la edad de los miembros de la familia como en la pregunta 4 anterior:</b> a) Fogón tipo herradura/Leña b) Fogón de lámina y barro /Leña c) Estufa/gas LP		
11. ¿De dónde se obtiene el combustible para cocinar y aproximadamente a qué distancia del hogar se encuentra la fuente de combustible (registre la distancia o el tiempo necesario para caminar hasta la fuente)?	<b>Dé respuestas para cada estufa/combustible dado en la pregunta 12</b>		
	Ubicación a) Vegetación silvestre en el perímetro de la población.	Distancia del hogar a) 10 km	
12. ¿Cuánto se consume y cuánto gasta la familia en cada tipo de combustible por mes?	<b>Responda para cada Estufa/combustible indicado en la respuesta a la pregunta 9</b>		
	<b>Consumo mensual de combustible</b> a) 26.8 kg b) 114.4 kg	<b>Gasto mensual en combustible</b> a) 99.3 MXN b) 423.7 MXN	
<b>Preguntas sobre la estufa de leña principal</b>			
13. ¿Qué tipos de ollas se usan para cocinar (por ejemplo, de fondo redondo o plano, de metal o de cerámica, etc.)?	Ollas y sartenes de acero y peltre de fondo circular		
14. ¿Se suelen utilizar tapas de ollas para cocinar?	En ocasiones, dependiendo del tipo de alimento preparado		
15. ¿Cómo se controla normalmente el fuego?	Se acomodan los leños cada cierto tiempo y se sopla con un abanico para acelerar la combustión.		

	<u>Tipo de mantenimiento</u>	<u>Frecuencia</u>
<b>16. ¿La familia lleva a cabo mantenimiento a la estufa principal?</b>	<b>Limpieza estufa de cenizas</b>  <b>Limpieza chimenea:</b> No tiene  <b>Reparación de grietas</b>  <b>Otra tarea:</b> Renovación del barro del fogón.	Nunca <input checked="" type="radio"/> Diario Semanal Mensual <input type="radio"/> Nunca Diario Semanal Mensual <input type="radio"/> Nunca Diario Semanal Mensual <input type="radio"/> Nunca Diario Semanal Mensual
<b>16. ¿Se usa la estufa para algún otro propósito que no sea cocinar alimentos para la familia (encierra en un círculo lo que corresponda)? No</b>	Preparación de alimentos para el ganado Preparar alimentos/bebidas para la venta comercial ¿Otro? _____	
<b>17. ¿Qué le gusta a la cocinera estufa de la principal?</b>	a) Arranque en un corto período. b) Rápida transferencia de calor a los recipientes u ollas	
<b>18. ¿Qué es lo que no le gusta al cocinero de la estufa principal?</b>	c) Liberación de humo excesivo d) Depósito de hollín en la superficie exterior de las ollas	
<b>19. Describa el estado y la apariencia de la estufa de leña principal y la cocina (sí es posible, haga un boceto o tome una foto).</b>	Fogón tradicional en forma de herradura, hecho de barro café en estado regular. Se observa acumulación excesiva de ceniza en el interior.	
<b>20. Sí la familia no está usando una estufa nueva actualmente, ¿está interesada en usar una?</b>	Sí	
<b>21. ¿Está dispuesta la familia a participar en un estudio más detallado que involucre mediciones diarias del consumo de combustible?</b>	Sí	
<b>22. ¿Está dispuesta la familia a participar en una encuesta de seguimiento para evaluar su satisfacción con la nueva estufa dentro de 3 a 6 meses?</b>	Sí	

Tabla A2 — Preguntas de la encuesta de seguimiento (KPT).

1. Fecha	16/07/2023	
2. Nombre del entrevistador	Christian Iván Arreola Gómez	
3. Coordenadas	Longitud: 94° 30' 41.04" W Latitud: 16° 20' 11.29" N Altitud: 10 m s. n. m	
4. Indique el sexo y la edad de los miembros de HH (hasta 10 personas):	<b>Género/Edad</b>	<b>Recuento</b>
	Niños (0-14 años)	0
	Mujeres mayores de 14 años	2
	Hombres (15-59 años)	2
	Hombres mayores de 59 años	0
<b>Información observable (a registrar por el entrevistador)</b>		
5. ¿Qué tipos de estufas están presentes en la cocina?	Estufas tradicionales de leña Estufa ecológica de leña Estufa de gas LP	
6. ¿La estufa mejorada aparece como si se hubiera usado recientemente? a. ¿La estufa está caliente al tacto? b. ¿Hay cenizas o brasas adentro? c. ¿Hay hollín alrededor de la cámara de combustible?	a) Sí b) Sí c) Sí	
7. ¿Dónde está la estufa (circule la respuesta apropiada)?	Interior de la cocina principal <input checked="" type="checkbox"/> Interior de la cocina secundaria Otro : _____	
8. ¿Parece como si también se estuvieran usando otras estufas? ¿Qué tipo(s) de estufa(s)?	Sí, fogón tradicional tipo herradura y metálico	
9. Describa el combustible que se está utilizando (describa el tipo de madera, el tamaño, la humedad, etc.)	Especies: espina blanca Dimensiones: 1.45 m x 12 cm x 12 cm Humedad: 21%	

<b>10. ¿Cuál es el estado de la estufa?</b> ¿Hay grietas en la estufa? ¿Está conectado el conducto de humos/chimenea? ¿Hay agujeros en la chimenea? ¿Hay una puerta? ¿Hay otros daños notables?		Buen estado  No  Sí  No  No  No
<b>11. ¿Hay evidencia de reparaciones hechas a la estufa (describa)?</b>		No, la estufa nunca ha sido reparada.
<b>12. Si la estufa tiene orificios de ventilación u otros mecanismos de control, ¿están funcionando (describa los detalles)?</b>		Sí, las entradas auxiliares de aire primario funcionan con normalidad. Los conductos de aire secundario se encuentran en buenas condiciones.
<b>Preguntas que plantear al usuario principal de la estufa mejorada</b>		
<b>13. ¿Cuánto tiempo lleva la familia usando esta estufa (meses o años)?</b>		9 meses
<b>14. ¿Con qué frecuencia usa la familia la estufa (encierre en un círculo lo que corresponda)?</b>		Todos los días <input checked="" type="radio"/> Varias veces a la semana Una vez por semana Menos de semanal Nunca
<b>a. Si el encuestado responde una vez a la semana o menos, pregunte por qué no se usa con más frecuencia.</b>		Razón:
<b>15. ¿Qué tipo de ollas se están usando en la nueva estufa (describa)?</b>		Ollas metálicas cilíndricas
<b>16. ¿La familia realiza mantenimiento a la estufa mejorada?</b>	<u><b>Tipo de mantenimiento</b></u>	<u><b>Frecuencia</b></u>
	Limpieza de cenizas	Nunca <input checked="" type="radio"/> Diario <input type="radio"/> Semanal <input type="radio"/> Mensual
	Limpieza chimenea	<input checked="" type="radio"/> Nunca <input type="radio"/> Diario <input type="radio"/> Semanal <input type="radio"/> Mensual
	Reparación de grietas	<input checked="" type="radio"/> Nunca <input type="radio"/> Diario <input type="radio"/> Semanal <input type="radio"/> Mensual
	Otra tarea: Renovación de la ceniza aislante de humo sobre el comal	<input checked="" type="radio"/> Nunca <input type="radio"/> Diario <input type="radio"/> Semanal <input type="radio"/> Mensual

<p>17. ¿Se usa la estufa para algún otro propósito que no sea cocinar alimentos para la familia (encierra en un círculo la respuesta que corresponda)? No</p>	<p>Preparación de alimentos para el ganado.</p> <p>Preparar alimentos/bebidas para la venta comercial.</p> <p>¿Otro? _____</p>		
<p>18. ¿Utiliza la familia algún otro tipo de estufa además de la estufa mejorada?</p> <p>En caso afirmativo, enumérelas (hasta dos estufas además de la estufa mejorada)</p>	<p><b>Estufa/combustible</b></p>	<p><b>Edad de la estufa (años)</b></p>	<p><b>Frecuencia de uso (veces por día, semana o mes)</b></p>
	<p>a) Estufa ecológica de doble combustión</p>	<p>1</p>	<p>10 veces por semana</p>
	<p>b) Fogón tipo herradura</p>	<p>9</p>	<p>2 veces por semana</p>
	<p>c) Fogón tradicional de acero</p>	<p>5</p>	<p>1 vez por semana</p>
	<p>d) Estufa de gas LP</p>	<p>14</p>	<p>6 veces por semana</p>
<p>19. ¿Cuánto combustible consume cada estufa y cuánto gasta la familia en cada tipo de combustible al mes?</p>	<p><b>Dé respuestas para cada estufa/combustible enumerado en la respuesta a la pregunta</b></p>		
	<p><b>Consumo mensual de combustible</b></p>		<p><b>Gasto económico equivalente</b></p>
	<p>a) 171.136 kg (6.112 kg diarios)</p>		<p>a) \$ 633.83</p>
	<p>b) 238.672 kg (8.524 diarios)</p>		<p>b) \$ 883.97</p>
	<p>c) No se evaluó</p>		<p>c) No se evaluó</p>
<p>20. ¿Es más fácil o difícil cocinar con la nueva estufa? Describa por qué.</p>	<p>Más fácil</p>		<p><b>¿Por qué?</b></p> <p>Se cocina en un ambiente más agradable al expulsar los gases contaminantes. Y se mantiene el calor en la estufa durante más tiempo.</p>
<p>21. ¿Toma más tiempo preparar las comidas usando la estufa nueva? En caso afirmativo, enumere las comidas que tardan más en prepararse.</p>	<p>Sí</p>		<p>Comidas:</p> <p>a) Carnes</p> <p>b) Caldos</p> <p>c) Frijoles</p> <p>d) Sopas</p> <p>e) Estofados</p>
<p>22. ¿Hay tareas de cocina más fáciles de realizar con la nueva estufa? En caso afirmativo, enumere estas tareas.</p>	<p>Sí</p>		<p>Tareas: Huevos revueltos, carnes fritas, recalentados.</p>

23. ¿Qué es lo que más le gusta al cocinero de la estufa?	Se cocina en un ambiente saludable al expulsar los contaminantes fuera de la cocina, se mantiene el calor dentro de la estufa durante un período prolongado y se ahorra combustible en comparación con la tecnología tradicional.	
24. ¿Hay algo que la cocinera cambiaría de la estufa nueva?	Se recomienda ampliar el tamaño de la entrada de combustible y reducir el tiempo en el que se alcanza una temperatura útil para cocinar.	
25. ¿Qué problemas tiene el cocinero con la estufa mejorada? Revise la siguiente lista e indique Sí o No según corresponda. También pregunte si la estufa nueva es mejor o peor que la vieja con respecto a cada problema.		
<u>Problema</u>	<u>El problema existe (Sí/No)</u>	<u>Mejor/peor que una estufa vieja:</u>
a. La estufa provoca quemaduras.	No	Mejor
b. Las ollas no son estables.	No	Mejor
c. Las ollas no encajan	No	Mejor
d. El fuego ennegrece las ollas	No	Mejor
e. La estufa hace mucho humo	No	Mejor
f. La estufa tarda mucho en calentarse	Sí	Peor
g. La estufa es difícil de encender	No	Igual
h. El fuego se apaga fácilmente	Sí	Peor
i. Difícil de controlar la temperatura	Sí	Peor
j. Es difícil cocinar ciertos alimentos (enumere los alimentos localmente apropiados a continuación)	No	Mejor
k. La estufa usa demasiada leña	No	Mejor
l. No se puede ajustar al tamaño preferido de combustible	No	Peor
m. La estufa no calienta la habitación durante las estaciones frías	Sí	Peor
n. La estufa no da luz	No	Peor
o. La estufa se rompe fácilmente.	No	Mejor
p. La estufa necesita mucho mantenimiento.	No	Mejor

## FASE CUANTITATIVA

### Medición del consumo y el contenido de humedad del combustible

A continuación, se describe el procedimiento para las mediciones de la humedad y el consumo de combustible establecido en el protocolo KPT versión 3.0.

1. Determine el enfoque o el tipo de estudio que se realizará (transversal o pareado).
2. Defina del número de hogares que se someterán a prueba y seleccione los hogares. Si es posible, se recomienda realizar una selección al azar en función de las familias que aceptaron participar de acuerdo con la encuesta previa. En caso contrario, seleccione hogares según lo permitan las circunstancias locales.
3. Defina el período de prueba de al menos 3 días consecutivos. Es recomendable evitar los fines de semana a menos que la prueba se extienda por una semana entera, además de los días festivos y eventos locales.
4. Explique a los miembros de la familia el propósito de la prueba y organice los horarios aproximados en los que se llevarán a cabo las mediciones del consumo de combustible todos los días. Es importante remarcar a los miembros del hogar que sus prácticas de cocina deben mantenerse de manera normal durante las pruebas.
  - a. Solicite a la familia que elija un área para almacenar el combustible medido durante las pruebas. En caso de que se recolecte o compre combustible sólido durante los días de la prueba, este debe almacenarse en un lugar separado del previamente seleccionado.
  - b. Registre la especie, la masa y el contenido de humedad de la reserva inicial de combustibles sólidos. Si se utilizan combustibles líquidos o gaseosos, registre también el stock inicial de combustible y pida a la familia que mantenga el combustible recién adquirido separado del ya medido.
5. Visite cada hogar aproximadamente a la misma hora todos los días.
  - a. Registre el género y la edad de cada persona, además de la cantidad de individuos que comieron en el hogar desde su última visita.

- b. Registre el consumo de combustible midiendo la masa restante al final de cada día de prueba.
  - c. Si la familia proporciona su propio combustible, registre la masa y el contenido de humedad del combustible recién adquirido antes de agregarlo al inventario previamente medido.
  - d. Si se proporciona leña a la familia, verifique que tengan suministros adecuados y agregue más a su inventario según sea necesario.
6. Una vez completado el estudio en todos los hogares, introduzca los resultados de al menos tres días de mediciones en el formulario de datos y cálculos de hogares de KPT 3.0 para determinar el consumo diario total y per cápita de todos los combustibles, así como de energía equivalente y la desviación estándar.
7. Finalmente, informe a las familias participantes sobre los resultados y agradézcales su cooperación.

Tabla A3 — Factores de equivalencia de "adulto estándar" definidos en términos de sexo y edad de Guidelines for Woodfuel Surveys, para la FAO, por Keith Openshaw citado en (Joseph, 1990).

<b>Género y edad</b>	<b>Fracción de equivalencia de adulto estándar</b>
Niño: 0-14 años:	0.5
Mujer: mayor de 14 años:	0.8
Hombre: 15-59 años:	1
Hombre: mayor de 59 años:	0.8

## Resultados de la evaluación cuantitativa mediante KPT

### Consumo de combustible en verano

Tabla A4 — Resultados de la KPT al emplear el fogón tradicional en la temporada de verano.

Fogón tradicional						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	2.58	0.72	3.36	1	67	1
2	2.92	0.81	3.95	1	67	1
3	5.71	1.59	4.06	2	136	2
4	6.71	1.86	5.82	2	173	1
5	3.31	0.92	2.69	3	82	1
6	2.64	0.73	2.27	1	61	1
7	2.81	0.78	3.18	1	66	1
<b>Total</b>	<b>26.68</b>	<b>7.41</b>	<b>25.33</b>	<b>11</b>	<b>652</b>	<b>8</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.81</b>	<b>1.06</b>	<b>3.62</b>	<b>1.57</b>	<b>93.14</b>	<b>1.14</b>

Tabla A5 — Resultados de la KPT al emplear la estufa ecológica Vilma en la temporada de verano.

Estufa ecológica de doble combustión “Vilma”						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	2.65	0.74	2.09	1	96	1
2	5.33	1.48	6.78	5	185	2
3	4.24	1.18	5.23	2	140	2
4	1.95	0.54	1.38	1	72	1
5	2.30	0.64	4.87	3	89	1
6	5.47	1.52	5.08	2	167	2
7	3.54	0.98	3.99	4	133	2
<b>Total</b>	<b>25.48</b>	<b>7.08</b>	<b>29.42</b>	<b>18</b>	<b>882</b>	<b>11</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.64</b>	<b>1.01</b>	<b>4.20</b>	<b>2.57</b>	<b>126</b>	<b>1.57</b>

## Consumo de combustible en otoño

Tabla A6 — Resultados de la KPT al emplear el fogón tradicional en la temporada de otoño.

Fogón tradicional						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	2.68	0.74	1.84	2	68	1
2	1.72	0.48	1.26	1	15	1
3	7.10	1.97	4.32	4	175	2
4	2.13	0.59	1.48	2	44	1
5	2.39	0.66	1.92	1	47	1
6	4.93	1.37	2.41	2	112	2
7	6.98	1.94	3.85	5	178	2
<b>Total</b>	<b>27.92</b>	<b>7.75</b>	<b>17.08</b>	<b>17</b>	<b>639</b>	<b>10</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.99</b>	<b>1.11</b>	<b>2.44</b>	<b>2.43</b>	<b>91.29</b>	<b>1.42</b>

Tabla A7 — Resultados de la KPT al emplear la estufa ecológica Vilma en la temporada de otoño.

Estufa ecológica de doble combustión “Vilma”						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	3.93	1.09	3.39	4	97	2
2	4.12	1.14	3.48	3	102	2
3	1.88	0.52	2.64	1	37	1
4	4.23	1.17	3.63	4	110	2
5	2.47	0.69	3.77	3	93	1
6	2.32	0.64	3.53	4	69	1
7	4.53	1.26	3.64	4	135	2
<b>Total</b>	<b>23.48</b>	<b>6.51</b>	<b>24.09</b>	<b>23</b>	<b>643</b>	<b>11</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.35</b>	<b>0.93</b>	<b>3.44</b>	<b>3.29</b>	<b>91.86</b>	<b>1.57</b>

## Consumo de combustible en invierno

Tabla A8 — Resultados de la KPT al emplear el fogón tradicional durante la temporada de invierno.

Fogón tradicional						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	5.06	1.41	4.98	5	139	2
2	6.25	1.74	6.41	5	184	2
3	5.35	1.49	6.87	5	149	2
4	4.39	1.22	4.01	4	115	2
5	4.79	1.33	4.43	4	114	2
6	1.29	0.36	0.74	1	21	1
7	3.46	0.96	3.83	2	84	2
<b>Total</b>	<b>30.59</b>	<b>8.51</b>	<b>31.27</b>	<b>26</b>	<b>806</b>	<b>13</b>
<b>Promedio</b>	<b>4.37</b>	<b>1.22</b>	<b>4.47</b>	<b>3.71</b>	<b>115.14</b>	<b>1.86</b>

Tabla A9 — Resultados de la KPT al emplear la estufa ecológica Vilma en la temporada de invierno.

Estufa ecológica de doble combustión "Vilma"						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	3.56	0.99	6.60	5	110	2
2	4.15	1.15	6.49	5	134	2
3	5.71	1.59	8.17	6	241	2
4	1.84	0.51	5.17	3	59	1
5	1.72	0.48	2.38	3	45	1
6	4.02	1.12	5.39	5	122	2
7	3.75	1.04	10.38	5	115	1
<b>Total</b>	<b>24.75</b>	<b>6.88</b>	<b>44.58</b>	<b>32</b>	<b>826</b>	<b>11</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.54</b>	<b>0.98</b>	<b>6.36</b>	<b>4.57</b>	<b>118</b>	<b>1.57</b>

### Consumo de combustible en primavera

Tabla A10 — Resultados de la KPT al emplear el fogón tradicional durante la temporada de primavera.

Fogón tradicional						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	2.54	0.64	1.67	1	60	1
2	3.13	0.78	2.43	1	45	1
3	2.88	0.72	2.10	1	79	1
4	3.01	0.75	2.70	1	55	1
5	2.64	0.66	1.85	1	73	1
6	3.68	0.92	2.22	2	82	1
7	2.98	0.74	2.34	2	70	1
<b>Total</b>	<b>20.86</b>	<b>5.21</b>	<b>15.31</b>	<b>9</b>	<b>464</b>	<b>7</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.98</b>	<b>0.74</b>	<b>2.18</b>	<b>1.29</b>	<b>66.28</b>	<b>1</b>

Tabla A11 — Resultados de la KPT al emplear la estufa ecológica Vilma en la temporada de primavera.

Estufa ecológica de doble combustión "Vilma"						
Día	Consumo de combustible total diario (kg)	Consumo diario de combustible per cápita (kg)	Masa de alimentos cocinados (kg)	Cantidad de platillos preparados	Tiempo de cocción (min)	Frecuencia de uso de la tecnología
1	2.71	0.68	2.86	1	73	1
2	2.44	0.61	3.42	3	100	1
3	3.05	0.76	3.06	3	85	1
4	2.54	0.64	3.27	3	100	1
5	2.90	0.73	2.76	2	75	1
6	3.14	0.79	5.64	4	169	1
7	3.30	0.83	3.23	3	100	1
<b>Total</b>	<b>20.08</b>	<b>5.04</b>	<b>24.24</b>	<b>19</b>	<b>702</b>	<b>7</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.87</b>	<b>0.72</b>	<b>3.46</b>	<b>2.71</b>	<b>100.28</b>	<b>1</b>

## **Anexo B: Prueba de emisiones de gases intramuros (PEI versión 1.0)**

Los recursos humanos, materiales, herramientas y equipos empleados son los siguientes:

- Estufa ecológica Vilma
- Usuario
- Temporizador
- Contador de material particulado FLUKE 985
- Medidor de monóxido de carbono UNI-T modelo UT337A
- Medidor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) TES 1370

Las especificaciones técnicas de equipos y herramientas se incluyeron en el Anexo C.

### **Metodología de la PEI versión 1.0**

#### **Preevaluación**

1. Se eligió un espacio en la cocina para colocar los instrumentos de medición de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub>. Esto se llevó a cabo de común acuerdo con el usuario con el fin de evitar la obstrucción de sus actividades durante la preparación de los alimentos.
2. Se midió la reserva inicial de combustible conforme al protocolo KPT.

#### **Evaluación**

1. Se colocó el sensor a 0.5 m frente a la entrada de la cámara de combustión y a una altura de 1.40 m, con el fin de emular la posición de un usuario frente a la estufa.
2. Se inició el fuego en la estufa. Posteriormente se iniciaron con las mediciones de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.0</sub> siguiendo las instrucciones del manual de operación de los sensores. Se registraron los valores de CO y CO<sub>2</sub> cada 5 minutos.

## Resultados de la evaluación cuantitativa mediante PEI

Tabla A12 — Resultados de la KPT al emplear el fogón en la temporada de verano.

FOGÓN		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	259.5	1.3
23.3	364.4	3.7
15.3	390.6	5.4
3.6	399.4	7
10.3	425.8	8.5
3.3	430.6	8.8
7.8	439.1	9
9.6	439.7	9.4
12	440.3	9.8
5.3	448.7	10.1
11	434.2	9.6
7.7	425.6	9.1
4.3	417	8.5

Tabla A13 — Resultados de la KPT al emplear la estufa Vilma en la temporada de verano.

VILMA		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	352.6	0.8
0.6	356.8	1.2
0.5	361.7	2.3
0	329.1	3.9
0	320.1	4.1
0	313.6	3.8
0	316.1	2.9
0	311.8	2.5
0	312.3	2.3
0	316.5	2.5
0	316.3	2.6
0	315.7	2.8
0	316.4	2.8
0	319.6	2.5
0	315.4	2.6
0	315.2	2.5
0	315	2.2
0	321	2
0	322.8	2.4

Tabla A14 — Resultados de la KPT al emplear el fogón en la temporada de otoño.

FOGÓN		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	340.5	1.1
14.2	462	3.6
19.6	515.9	7.5
10.7	535.8	9.6
9.9	552.3	10.2
3.4	558	11
5.2	566.9	11.3
5.5	589.6	11.45
5.8	611.4	11.6
1.4	542	12
3	559.6	12.4
2.5	602.3	12.6

Tabla A15 — Resultados de la KPT al emplear la estufa Vilma en la temporada de otoño.

VILMA		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	441	1.5
0.1	472.1	2.2
0	454.4	2.2
0.5	441.4	3.1
0	436.2	3.3
0	432	3.8
0	430.3	4
0	429.7	4.1
0	432.7	3.8
0	430.1	4.2
0	306.8	4

Tabla A16 — Resultados de la KPT al emplear el fogón en la temporada de invierno.

FOGÓN		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	376.8	2.9
11.4	426.1	4.7

18.3	445.3	6.2
11.3	417.4	7.8
6.6	418.7	8.7
1.9	423.1	9.6
1.8	423.8	10.2
1.9	426.4	10.6
1.9	428.9	11
1.7	424.5	11.9
3.8	425.8	12
3.2	424.2	12.1
2.6	427	12.2
2	424.2	12.5
0.6	427	11.7
0	372.3	11.4

Tabla A17 — Resultados de la KPT al emplear la estufa Vilma en la temporada de invierno.

VILMA		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	391.7	1.1
0	479.9	2.4
0.3	488	3.9
0	479	4.2
0.1	470.6	3.7
0	467.3	3.9
0	463.4	3.5
0	464.3	3.6
0	464.6	3.4
0	460.9	3.4
0	466.4	3.8
0	471.8	3.7
0	473.4	3.6
0	475	3.4
0	478.8	3.5
0	476.8	3.4

Tabla A18 — Resultados de la KPT al emplear el fogón en la temporada de primavera.

FOGÓN		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	190	1.1
9.4	320	3.2
9.3	376	4.3
13.4	433	5.8
15.9	469	7.4
8.9	501	8
5	525	8.8
5.4	526	9.4

Tabla A19 — Resultados de la KPT al emplear la estufa Vilma en la temporada de primavera.

VILMA		
CO	CO <sub>2</sub>	PM <sub>2.0</sub>
0	203.3	0.9
0	301.2	1.4
0	351.7	2
0	369.8	3.2
0	368.7	3.7
0	345.1	4.1
0	363.2	3.9
0	338.6	4.4
0	352.2	4
0	333.4	4.6
0	338.8	4.1
0	344.2	3.7
0	333.2	3.9

## Evaluación de resultados mediante la Norma Oficial Boliviana NB-83001

Los anexos normativos M y N de la Norma Boliviana NB-83001 establecida por el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) para Cocinas mejoradas-Condiciones técnicas mínimas de instalación, funcionamiento y rendimiento indican los siguientes estándares para la evaluación de la reducción del CO y PM<sub>2.5</sub> al implementar tecnologías de cocción mejoradas.

Tabla A20 — Estándar para la evaluación de la reducción de CO.

Reducción relativa del CO (%)	Reducción relativa referencial de CO (%)	Evaluación de conformidad
Valor obtenido mediante la prueba	≥85 %	Sí/No

Tabla A21 — Estándar para la evaluación de la reducción de PM<sub>2.5</sub>.

Reducción relativa del PM <sub>2.5</sub> (%)	Reducción relativa referencial del PM <sub>2.5</sub> (%)	Evaluación de conformidad
Valor obtenido mediante la prueba	≥85 %	Sí/No

De acuerdo con la Norma Boliviana NB-83001 las cocinas mejoradas que cumplen las condiciones técnicas mínimas mencionadas previamente son dispositivos apropiados para su implementación, que contribuyen a la protección de la salud de los usuarios y del medio ambiente. Sin embargo, para evaluar los parámetros mencionados, se debe determinar la reducción relativa referencial mediante las siguientes ecuaciones.

	$R_{r,CO} = \frac{C_b - C_p}{C_b} \times 100$	<b>Ec. 12</b>
	$R_{r,PM-2.5} = \frac{C_b - C_p}{C_b} \times 100$	<b>Ec. 13</b>
	<p>Donde:</p> <p><math>R_{r,CO}</math> = Concentración relativa de CO</p> <p><math>R_{r,PM-2.5}</math> = Concentración relativa de PM<sub>2.5</sub></p> <p><math>C_b</math> = Concentración base</p> <p><math>C_p</math> = Concentración de la prueba</p>	

## Anexo C: Características de los equipos e instrumentos de evaluación

Tabla A22 — Características de la báscula electrónica Torrey modelo LEQ — 10.

<b>Especificaciones técnicas: Torrey LEQ - 10</b>	
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	<b>RANGO O VALOR DE OPERACIÓN/MATERIAL</b>
<b>Rangos máximo de medición</b>	10 kg
<b>Precisión</b>	2 gr
<b>Material</b>	acero inoxidable, cuarzo liquido
<b>Temp. de operación</b>	-10 a 40°C (14 a 104°F)
<b>Temp. de almacenaje</b>	-20 a 50°C (-4 a 122°F)
<b>Peso neto</b>	3.5 kg
<b>Fuente de alimentación</b>	100/240 V AC 50/60 Hz Batería recargable
<b>Dimensiones</b>	14.7 cm x 4.2 cm x 2.5 cm

Tabla A23 — Características del medidor de humedad y temperatura Mestek modelo MW700.

<b>Especificaciones técnicas: Mestek MW700</b>	
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	<b>RANGO O VALOR DE OPERACIÓN/MATERIAL</b>
<b>Humedad de la madera y material de construcción</b>	1 % ~ 75 %, 0.1 % 0.1 % ~ 2.4 %, 0.1 %
<b>Temperatura ambiente</b>	- 10°C ~ 60°C (0°C ~ 45°C, ±1 %) (-10°C ~ 0°C, 45°C ~ 60°C, ±1)
<b>Humedad relativa ambiental</b>	1 % ~ 100 %
<b>Material</b>	ABS
<b>Nivel de protección</b>	IP20
<b>Velocidad de medición</b>	0.5 seg
<b>Condición de funcionamiento</b>	0°C ~ 40°C 0 RH ~ 85 RH
<b>Fuente de alimentación</b>	2 baterías AAA
<b>Dimensiones</b>	14.7 cm x 4.2 cm x 2.5 cm

Tabla A24 — Características del medidor de concentración de CO<sub>2</sub> TES modelo 1370.

<b>Especificaciones técnicas: TES 1370</b>	
<b>RANGO DE MEDICIÓN</b>	<b>RANGO O VALOR DE OPERACIÓN</b>
<b>Rangos de medición de CO<sub>2</sub>, Temperatura y RH</b>	0 ppm ~ 6000 ppm -20°C ~ 60°C 10 % RH ~ 95 % RH
<b>Precisión</b>	±3 % (CO <sub>2</sub> ), ± 5 % (Temperatura) ±3% (RH: 30 % ~ 95 %) ±5% (RH: 10 % ~ 30 %)
<b>Condiciones de operación</b>	Temperatura: 5°C ~ 50°C Humedad: 10°C ~ 90°C
<b>Fuente de alimentación</b>	6 baterías AAA, Cable auxiliar
<b>Tamaño</b>	15.8 cm × 7.2 cm × 3.5 cm

Tabla A25 — Características del medidor de CO UNI-T modelo UT337A.

<b>Especificaciones técnicas: UNI-T UT337A</b>	
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	<b>RANGO O VALOR DE OPERACIÓN/MATERIAL</b>
<b>Rango de medición de CO</b>	0 ppm - 1000 ppm
<b>Precisión</b>	±5 % o 5 ppm
<b>Resolución</b>	1 ppm
<b>Tipo de sensor</b>	Sensor electroquímico de gas (CO)
<b>Método de muestreo</b>	Difusión
<b>Fuente de alimentación</b>	Baterías AAA 1.5 V × 4
<b>Dimensiones</b>	19.7 cm × 5.48 cm × 3.38 cm

Tabla A26 — Características del contador de partículas Fluke modelo 985.

<b>Especificaciones técnicas: Fluke 985</b>	
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	<b>RANGO O VALOR DE OPERACIÓN/MATERIAL</b>
<b>Rango de tamaño de partícula</b>	0.3 µm, 0.5 µm, 1.0 µm, 2.0 µm, 5.0 µm, 10.0 µm
<b>Caudal</b>	0.1 cfm (2.83 L/min)
<b>Modo de recuento</b>	#/ft <sup>3</sup> , #/m <sup>3</sup> , #/l en modo acumulativo o diferencial
<b>Límites de concentración</b>	10 % a 4.000.000 por pie cúbico (según ISO 21501)
<b>Almacenamiento de datos</b>	10,000 registros (búfer giratorio)
<b>Dimensiones</b>	27.2 cm × 9.9 cm × 5.3 cm

## **Anexo D: Manual de usuario de la estufa ecológica Vilma**

### **INTRODUCCIÓN**

La estufa ecológica Vilma es un dispositivo diseñado para la cocción de alimentos considerando las necesidades y preferencias de los usuarios del sureste del país. Esta tecnología mantiene el fuego aislado en un pequeño espacio, con el fin de contener el calor generado durante la combustión de la biomasa y direccionarlo hacia el área de cocción (comal), además, de expulsar las emisiones contaminantes fuera de las zonas de cocinado.

Este modelo implementa una combinación de materiales térmicos, ligeros y duraderos, además de piezas sustituibles, con el objetivo de mitigar algunos de los problemas presentes en las tecnologías existentes, como las elevadas emisiones de contaminantes gaseosos generadas durante la combustión ineficiente, el excesivo consumo de combustible, además, de la baja seguridad de operación, la limitada portabilidad debido al peso y el alto costo de fabricación.

Entre las ventajas que la estufa Vilma presenta en comparación con modelos precedentes, destaca la

implementación de entradas de aire para lograr una doble combustión. Esto permite al dispositivo ahorrar combustible, almacenar el calor generado durante periodos más prolongados, alcanzar temperaturas más elevadas y reducir los tiempos de cocción.

Además, este diseño permite a los usuarios cocinar de manera cómoda y segura varios alimentos de forma simultánea, al integrar un comal con espacio para más de un recipiente, junto con paredes y soportes de madera en los laterales que funcionan como aislantes para las partes metálicas y sostienen los recipientes y utensilios empleados durante las actividades de cocción.

Otro beneficio de gran importancia es el buen desempeño de la estufa Vilma en la reducción de emisiones dentro de la cocina, al mantenerse por debajo de los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA).

Este documento aborda brevemente el estado del arte de los principales modelos de estufas ecológicas implementados en México, Centroamérica y el Caribe. Además, describe las características de los componentes y piezas que conforman la

estufa Vilma, así como las metodologías para la instalación, operación, mantenimiento preventivo y correctivo del dispositivo.

Para optimizar el uso de la tecnología, se incluyen algunas recomendaciones para su operación y el manejo de la leña. Asimismo, se mencionan las probables causas y soluciones para los problemas comunes en este tipo de estufas. Finalmente, se anexa una normativa para garantizar la seguridad del usuario y mantener el dispositivo en buen estado.

## **PANORAMA GENERAL DE LAS ESTUFAS ECOLÓGICAS**

Las estufas ecológicas son tecnologías para la cocción de alimentos que emplean principalmente leña como combustible; sin embargo, también pueden utilizar otras formas de biomasa (residuos forestales, agrícolas, entre otros). Estos dispositivos están diseñados para ahorrar combustible en comparación con los fogones y expulsar de las cocinas los gases contaminantes generados durante la combustión, lo que, a su vez disminuye en gran medida los riesgos para la salud de los usuarios, además, son más estéticas y seguras que los modelos tradicionales.

En las últimas décadas, múltiples investigadores e instituciones han creado diversas tecnologías que utilizan

biomasa (leña, carbón vegetal, estiércol, entre otros) como combustible para la cocción de alimentos en distintos países de Centroamérica y del Caribe. Entre los modelos más antiguos se incluyen la “Lorena”, “Onil” “Justa”, “Josefina”, “Santa Ana”, “Estufa mejorada”, y “Ceta”. Es importante señalar que, el primero de estos dispositivos se ha implementado en gran medida en la región de México, estableciendo uno de los primeros antecedentes de las estufas ecológicas actuales [3, 153].

Asimismo, en México se han creado diversos modelos de estufas ecológicas considerando las preferencias (color, forma, complementos como parrillas y soportes, entre otros) y necesidades de los usuarios (altura, dimensiones, chimeneas, etc.). Actualmente, las principales tecnologías con mayor distribución a nivel nacional son la “Patsari”, desarrollada en 2003 por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) y la Universidad Nacional Autónoma de México. En los años siguientes, se realizaron modificaciones en el diseño original, lo que dio lugar a la aparición de hasta cuatro variantes, incluyendo la “Patsari portátil” [6, 66, 154].

Por otro lado, alrededor del 2006, la sociedad U’yo’olché A. C. desarrolló e implementó la estufa “Túumben K’óoben” en la península de Yucatán, como una contramedida para las

emisiones de la combustión y el alto consumo de combustible [66, 155, 156]. Asimismo, en 2009, la empresa social InfraRural diseñó el primer prototipo del modelo denominado “Xalpaneca”, que posteriormente se implementó en hasta nueve estados de la república para mitigar las problemáticas que enfrentan las familias de las zonas rurales del país [157, 158]. Años más tarde, en 2010, la empresa Ecostufa lanzó al mercado su propio diseño bajo el mismo nombre, el cual hoy en día cuenta con las variaciones “Repisa”, “Mampara” y “Empotrable” [159]. Otros modelos, distribuidos en menor medida y de los que no se ha encontrado información sobre su fecha de creación, incluyen la “Palermo”, “María”, “Mera-Mera”, “Ñuu Savi”, “Eco-Flama” entre otros [160 - 163].

Entre las instituciones mencionadas se encuentra el IIIER-UNICACH, el cual ha desarrollado los modelos Lekil Vaj (2012), Lekil Vaj mejorada (2014), Enerchía (2016), Llamalinda (2019) y Vilma (2022), para luego implementarlos en el sureste del país [63, 68].

Tabla A27 - Modelos desarrollados en el IIIER - UNICACH antes de la estufa Vilma.



Figura D1 — Estufa ecológica Lekil Vaj. (Foto: O. Martínez)



Figura D2 — Estufa ecológica Lekil Vaj mejorada. (Foto: O. Martínez)



Figura D3 — Estufa ecológica Enerchía. (Foto: O. Martínez)



Figura D4 — Estufa ecológica Llamalinda. (Foto: O. Martínez)

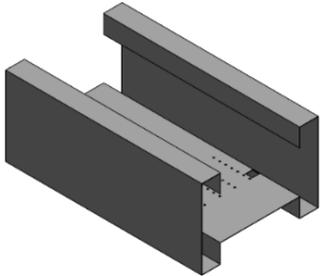
## COMPONENTES PRINCIPALES

En este apartado se describen las características de los elementos que integran la estufa ecológica de doble combustión Vilma, para ello, se dividió el dispositivo en tres componentes: la cámara de combustión, la chimenea y la base o soporte.

## Cámara de combustión

La cámara de combustión es uno de los principales componentes de la estufa ecológica, este elemento se encarga de propiciar un entorno controlado para la combustión de leña mediante la implementación de materiales conductores y aislantes térmicos. En la tabla A28 se presenta la nomenclatura asignada, el nombre y múltiples imágenes representativas de las piezas que conforman la cámara de combustión.

Tabla A28 — Componentes de la cámara de combustión.

Nomenclatura	Nombre	Vistas del modelo 3D
<b>A</b>	Estructura central fabricada de acero	 <p data-bbox="583 1263 1018 1351">Figura D5 — Imagen representativa de la estructura central elaborada de acero.</p>

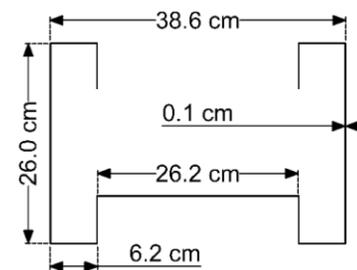


Figura D6 — Dimensiones de la pared frontal de la estructura central.

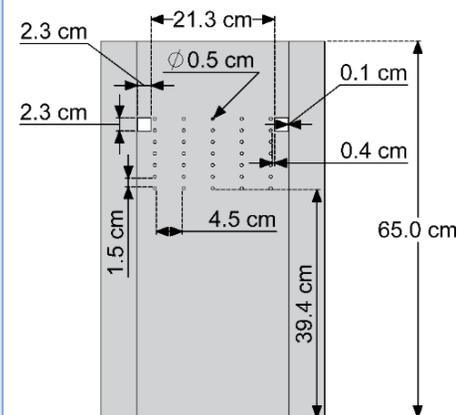
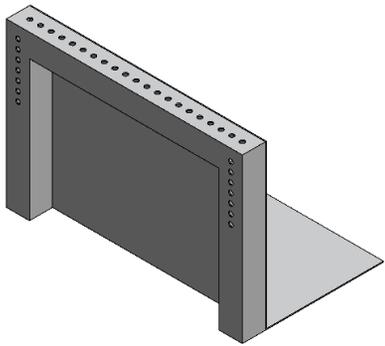
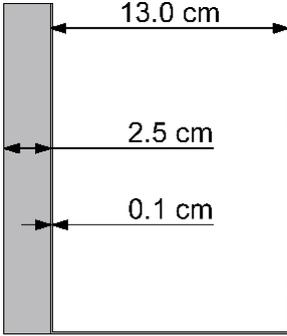
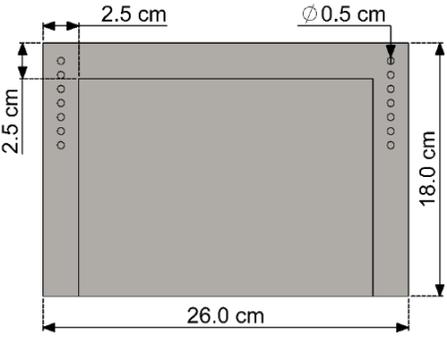
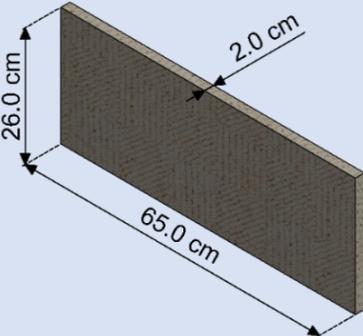
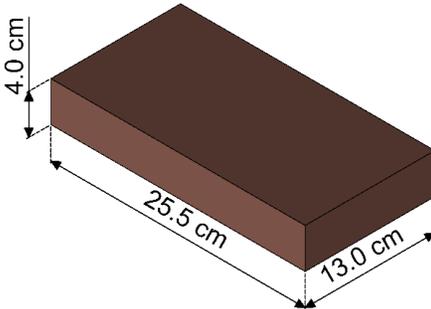
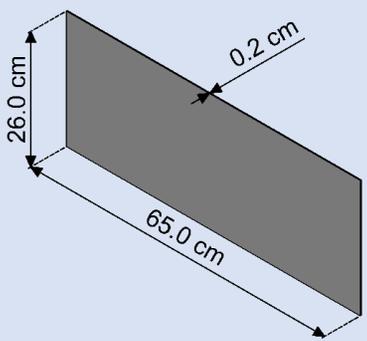
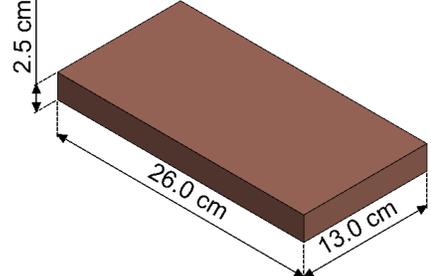
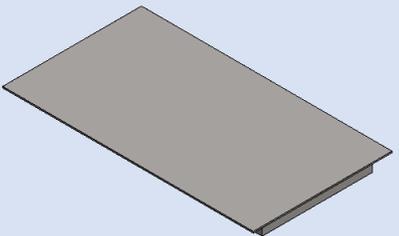
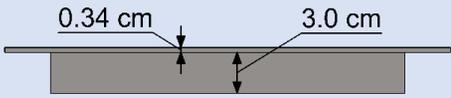


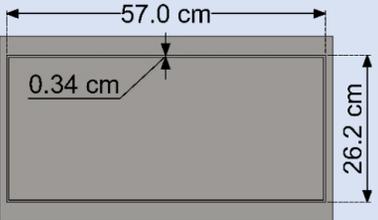
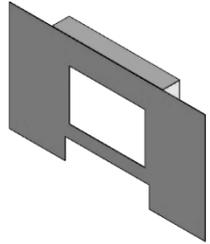
Figura D7 — Posición y dimensiones de los orificios en la estructura central.

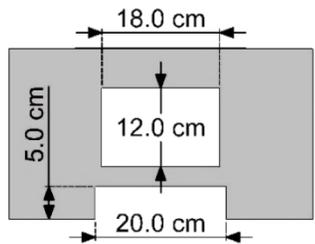
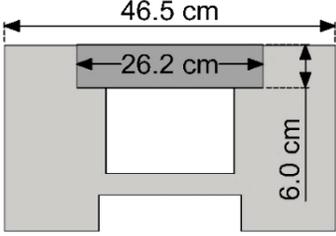
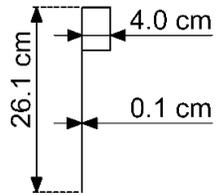
<b>B</b>	Retardador de llamas elaborado de acero		<p>Figura D8 — Imagen representativa del retardador de llamas elaborado de acero.</p>
			<p>Figura D9 — Dimensiones de la pared lateral del retardador de llamas.</p>

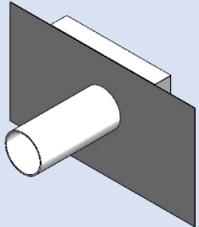
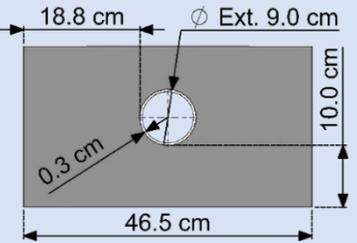
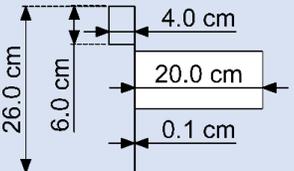
<b>C</b>	Pared aislante interna elaborada de fibra cerámica		<p>Figura D10 — Dimensiones de la pared frontal y los orificios del retardador de llamas.</p>
			<p>Figura D11 — Imagen representativa con dimensiones de la pared aislante interna elaborada de fibra cerámica.</p>

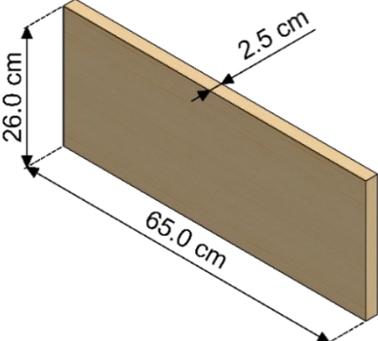
<p><b>D</b></p>	<p>Ladrillo fabricado de arcilla cocida</p>	 <p>Figura D12 — Imagen representativa con dimensiones de un ladrillo fabricado de arcilla cocida.</p>
<p><b>E</b></p>	<p>Lamina elaborada de acero para separar las paredes de fibra cerámica y los ladrillos</p>	 <p>Figura D13 — Imagen representativa con dimensiones de la lámina elaborada de acero que separa las paredes de fibra cerámica y los ladrillos.</p>

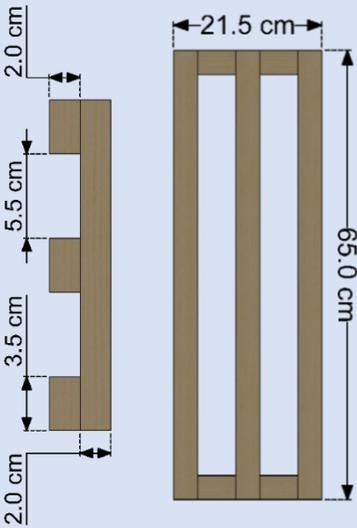
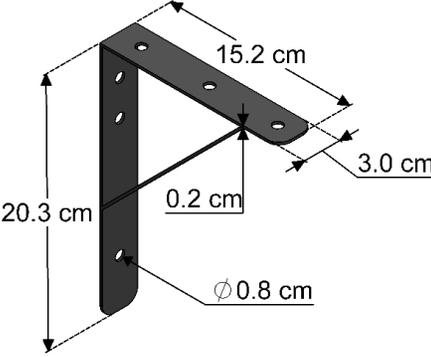
<p><b>F</b></p>	<p>Petatillo fabricado de arcilla cocida</p>	 <p>Figura D14 — Imagen representativa con dimensiones de un petatillo fabricado de arcilla cocida.</p>
<p><b>G</b></p>	<p>Comal fabricado de hierro</p>	 <p>Figura D15 — Imagen representativa del comal fabricado de hierro.</p>  <p>Figura D16 — Dimensiones de la pared lateral del comal.</p>

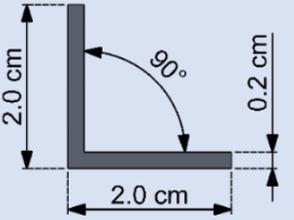
		 <p>Figura D17 — Dimensiones la pared superior del comal.</p>  <p>Figura D18 — Dimensiones de la pared inferior del comal.</p>
<p><b>H</b></p>	<p>Cubierta frontal de la cámara de combustión elaborada de acero</p>	 <p>Figura D19 — Imagen representativa de la cubierta frontal de acero de la cámara de combustión elaborada de acero.</p>

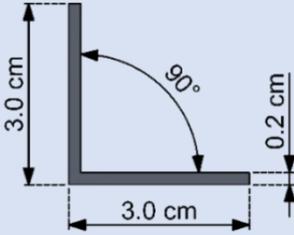
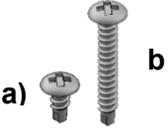
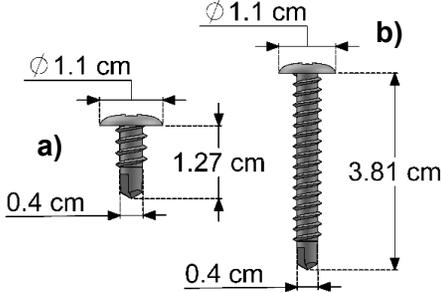
		 <p>Figura D20 — Dimensiones de las aberturas en la cubierta frontal de la cámara de combustión.</p>  <p>Figura D21 — Dimensiones de la cubierta frontal de la cámara de combustión.</p>  <p>Figura D22 — Dimensiones del costado lateral de la cubierta frontal de la cámara de combustión.</p>
--	--	---

<b>I</b>	Cubierta posterior de la cámara de combustión elaborada de acero		<p>Figura D23 — Imagen representativa de la cubierta posterior de la cámara de combustión elaborada de acero.</p>
			<p>Figura D24 — Dimensiones de la cubierta posterior de la cámara de combustión.</p>
			<p>Figura D25 — Dimensiones del costado lateral de la cubierta posterior de acero de la cámara de combustión.</p>

<b>J</b>	Pared lateral externa fabricada de madera		<p>Figura D26 — Imagen representativa con dimensiones de una pared lateral externa fabricada de madera.</p>
		<b>K</b>	Soporte para utensilios y recipientes fabricado de madera

		 <p>Figura D28 — Dimensiones del soporte para utensilios y recipientes.</p>
<p><b>L</b></p>	<p>Ménsula de 8 x 10 pulgadas (15.2 x 20.3 cm) fabricada de acero</p>	 <p>Figura D29 — Dimensiones de la ménsula de 8 x 10 pulgadas elaborada de acero.</p>

<p><b>M</b></p>	<p>Ángulo de 90° elaborado de acero</p>	 <p>Figura D30 — Imagen representativa de un ángulo de 90° elaborado de acero.</p>  <p>Figura D31 — Longitud del ángulo inferior (a).</p>  <p>Figura D32 — Longitud del ángulo superior (b).</p>  <p>Figura D33 — Dimensiones transversales del ángulo inferior (a).</p>
-----------------	---	--

		 <p>Figura D34 — Dimensiones transversales del ángulo superior (b).</p>
<p><b>N</b></p>	<p>Tornillos auto perforantes fabricados de acero</p>	 <p>Figura D35 — Imagen representativa de tornillos auto perforantes de ½ pulgada (a) y 1 ½ pulgadas (b) fabricados de acero.</p>  <p>Figura D36 — Dimensiones de tornillos auto perforantes de ½ pulgada (a) y 1 ½ pulgadas (b).</p>

La cámara de combustión está diseñada para resistir y contener las altas temperaturas alcanzadas durante la combustión de leña. Para ello, este componente incorpora una estructura central hecha de acero (A), con una geometría que permite acoplar los demás elementos de la tabla A28, además de incluir conductos y aberturas para el ingreso del aire necesario para el correcto funcionamiento del dispositivo.

En la figura D37 se observa el interior de la cámara de combustión ensamblada, que muestra la posición de los elementos mencionados en tabla , entre los que se incluyen una estructura central (A) y un retardador de llamas (B), elaborados en acero, así como las capas internas de las paredes laterales, compuestas por fibra cerámica (C) y ladrillos (D), las cuales se encuentran separadas por una lámina de metal (E). De igual manera, la pared inferior incorpora petatillos (F), con la excepción de la superficie que presenta orificios para el ingreso de aire.

Asimismo, la figura D38 muestra el modelo 3D de la cámara de combustión ensamblada, que integra una cubierta frontal de acero (H) con aberturas para el ingreso de combustible y aire, necesarios para el correcto funcionamiento de la estufa (doble combustión). Además, cuenta con un comal de hierro desmontable (G) para colocar los recipientes con alimentos. A

su vez, este modelo incorpora, en cada lateral, una pared externa de madera (L) unida a un soporte para utensilios y recipientes (K).

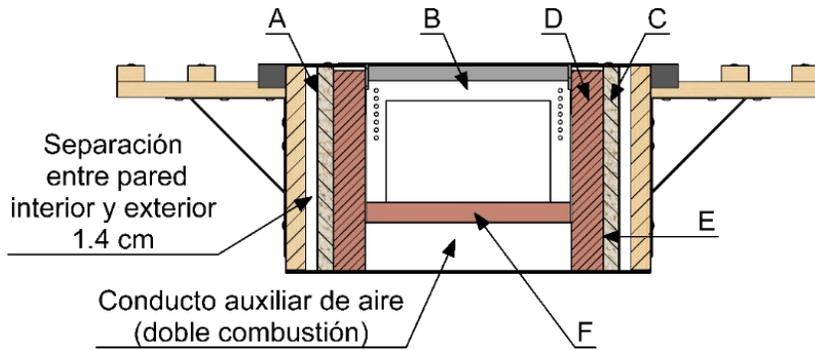


Figura D37 — Vista de sección interna de la cámara de combustión.

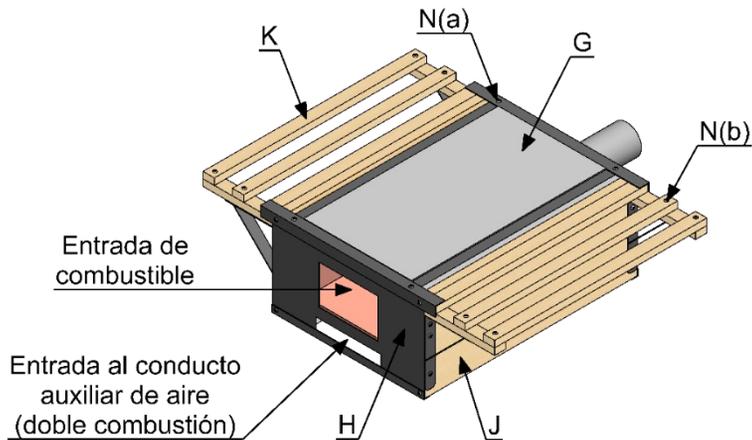


Figura D38 — Vista tridimensional de la cámara de combustión.

Por su parte, las figuras D39 y D40 presentan la cubierta posterior (I) y una de las paredes laterales (J) de la cámara de combustión, en las cuales se observa una estructura cilíndrica que permite el acople de la chimenea. Estos componentes se mantienen en su posición mediante ménsulas (L), ángulos de acero a 90° (M) y tornillos (N).

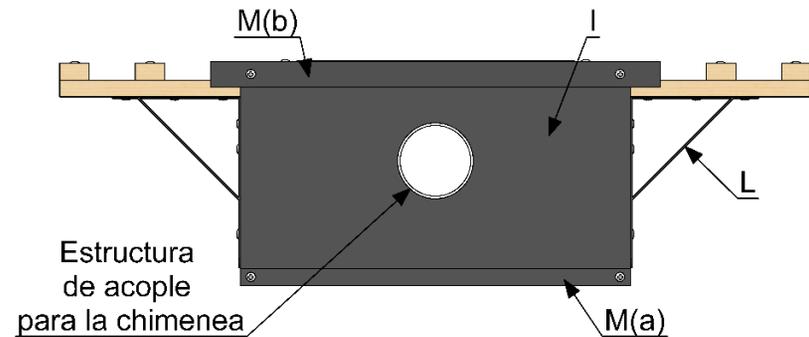


Figura D39 — Vista frontal de la cámara de combustión.

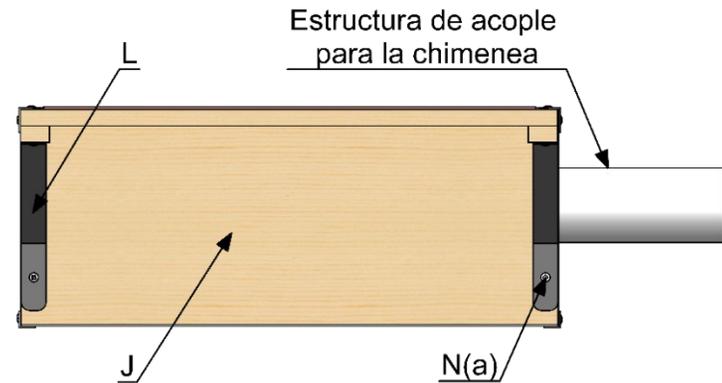
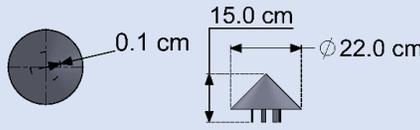


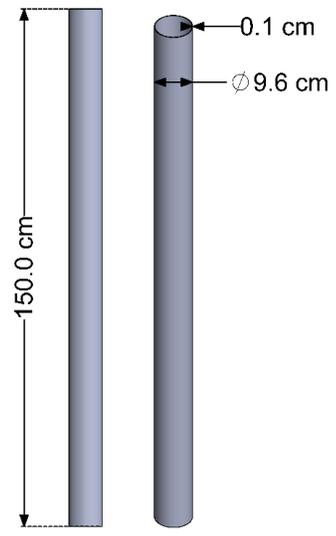
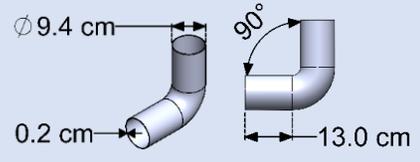
Figura D40 — Vista frontal de la cámara de combustión.

## Chimenea

La chimenea es uno de los componentes esenciales de la estufa Vilma. Esta cumple la función de redirigir los gases generados por la combustión hacia el exterior de la cocina. En la tabla A29 se presenta el nombre de cada pieza, la nomenclatura asignada e imágenes del modelo 3D de las partes que conforman este elemento. Entre las piezas que conforman la chimenea se incluyen un gorro o sombrero (Ñ), que evita obstrucciones en el resto de la estructura debido al ingreso de objetos externos; un tubo o ducto (O) para redirigir los gases generados durante la operación de la estufa; y un codo de acero a 90° (P) para acoplar las piezas previamente mencionadas a la cámara de combustión.

Tabla A29 - Componentes de la chimenea.

Nomenclatura	Nombre	Vistas del modelo 3D
Ñ	Sombrerito o gorro para chimenea fabricado de acero	 <p>Figura D41 — Imagen representativa de un sombrero para chimenea fabricado de acero.</p>

O	Tubo de expulsión de gases para chimenea fabricado de acero	 <p>Figura D42 — Imagen representativa del tubo de expulsión de gases para chimenea fabricado de acero.</p>
P	Codo de 90° para chimenea fabricado de acero	 <p>Figura D43 — Imagen representativa de un codo de 90° fabricado de acero.</p>

En la figura D44 se observa una imagen representativa de la chimenea ensamblada, en la cual se observa la posición de los componentes mencionados. Además, se incluye una vista que incluye la cámara de combustión acoplada.

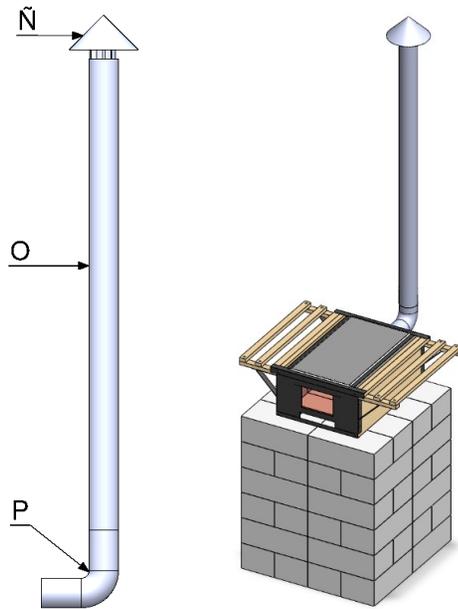


Figura D44 — Imagen representativa de la cámara de combustión acoplada a la chimenea.

### Base o soporte

La base es el componente encargado de soportar los demás elementos de la estufa ecológica. En la figura D45 se observa un modelo representativo de la cámara de combustión

sobre una base compuesta por 6 niveles de bloques (Q) alineados de manera horizontal. Para ello, se colocó cada capa de forma perpendicular a la anterior y a la siguiente, con el fin de brindar mayor estabilidad a la plataforma. Es importante considerar que esta estructura debe montarse sobre un suelo llano, firme y sin ningún tipo de inclinaciones o desniveles.

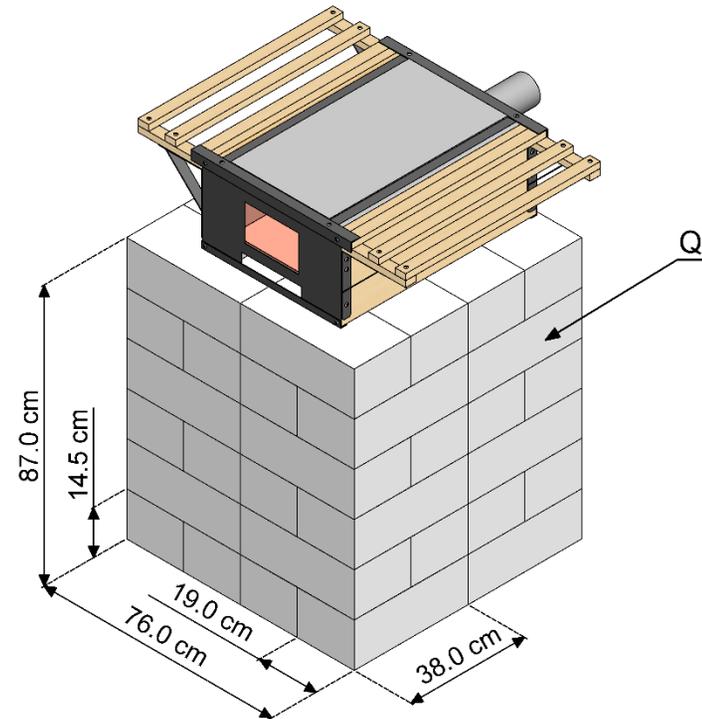


Figura D45 — Cámara de combustión sobre base de bloques de cemento.

## INSTALACIÓN DE LA ESTUFA ECOLÓGICA

Para realizar la instalación de la estufa Vilma, es necesario considerar algunas características del lugar en cual se implementará el dispositivo y seguir la metodología descrita en este apartado.

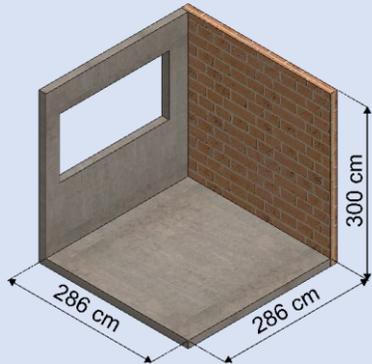
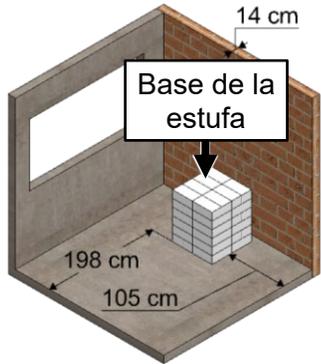
### Requisitos del lugar de instalación

1. Se recomienda que el espacio seleccionado cuente con techo para evitar que la estufa se moje o se exponga a la radiación solar.
2. Se sugiere que el espacio elegido tenga al menos 6.25 m<sup>2</sup> (2.5 x 2.5 m) considerando el área suficiente para el dispositivo y el usuario.

### Procedimiento de instalación

En la tabla A30 se describe la metodología para la instalación de la estufa ecológica Vilma, considerando un espacio adecuado y los requisitos mencionados.

Tabla A30 — Instrucciones para la instalación de la estufa ecológica Vilma.

Instrucciones e imagen representativa
 <p>Figura D46 — Seleccione la ubicación para la instalación de la estufa ecológica Vilma.</p>
 <p>Figura D47 — Monte la base para la estufa ecológica a una distancia de la pared seleccionada que permita acoplar la chimenea a la cámara de combustión considerando el grosor de la pared.</p>

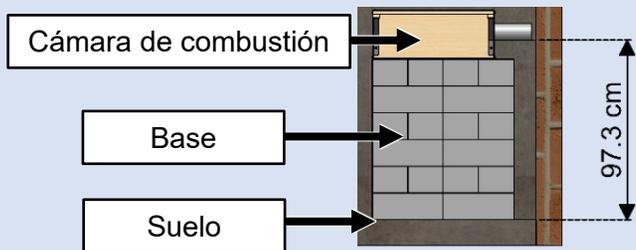


Figura D48 — Coloque la cámara de combustión sobre la base, seguidamente, determine la distancia entre el suelo y la estructura para el acople de la chimenea.



Figura D50 — Coloque la cámara de combustión sobre la base e introduzca la estructura de acople para la chimenea en la abertura del muro.

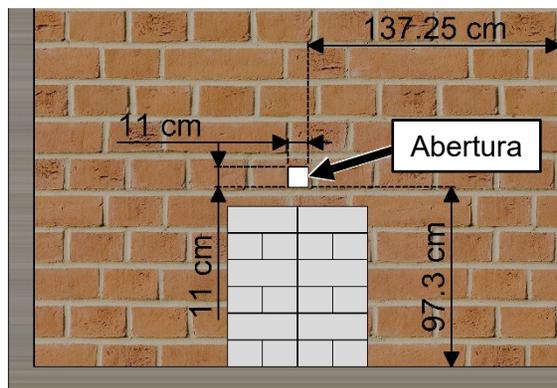


Figura D49 — Realice una abertura en el muro de hasta 11 x 11 cm (121 cm<sup>2</sup>) a la altura previamente medida.

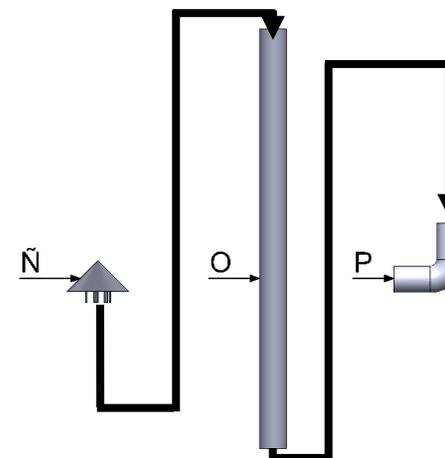


Figura D51 — Conecté entre si las piezas de la chimenea.

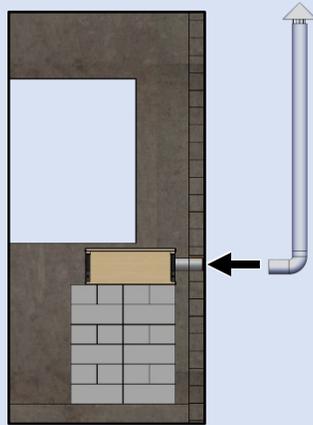


Figura D52 — Acoplé la chimenea a la estufa por medio de la abertura en la pared

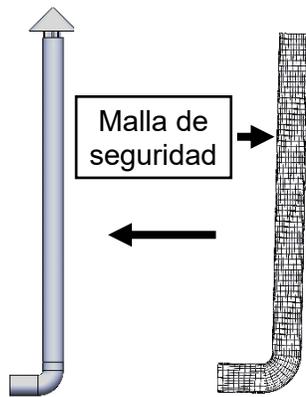


Figura D53 — Coloque un aviso o letrero y una malla de seguridad alrededor de la chimenea para prevenir accidentes.

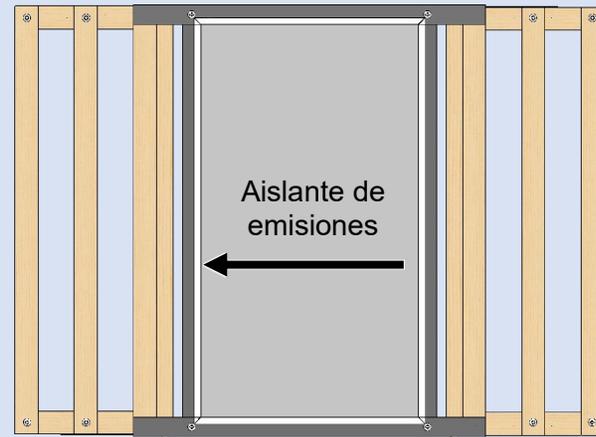


Figura D54 — Selle los espacios entre la cámara de combustión y el comal empleando el procedimiento descrito en la tabla A33.

## USO Y MANTENIMIENTO

En este apartado se describe el método de operación y los pasos para realizar el mantenimiento preventivo y correctivo de la estufa ecológica de doble combustión Vilma.

### Procedimiento de operación

En la tabla A31 se describe la metodología de operación óptima para la estufa ecológica de doble combustión Vilma.

Tabla A31 — Instrucciones de operación de la estufa Vilma.

#### Instrucciones e imagen representativa

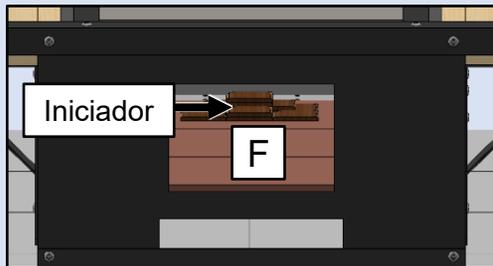


Figura D55 — Introduzca el iniciador del fuego (corteza seca de leña humedecida en alcohol, papel y/o cartón) en la cámara de combustión apilándolo sobre el petatillo (F) más alejado de la entrada de la cámara de combustión.

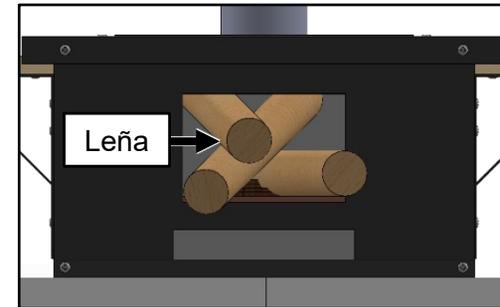


Figura D56 — Apile el combustible sobre el iniciador, para ello se sugiere emplear leña con una longitud máxima de 60 cm y un grosor inferior a las medidas de la entrada de combustible.

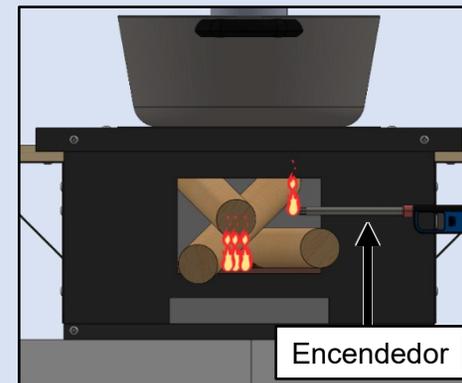


Figura D57 — Coloque los recipientes con alimentos sobre el comal (G), posteriormente, encienda el iniciador. En el caso de observar dificultades durante el arranque de la combustión introduzca más iniciador y avive el fuego forzando una mayor circulación de aire.



Figura D58 — Vigile el fuego durante los primeros minutos posteriores al arranque de la combustión. Se recomienda atizar el combustible en el caso de que se observen llamas de baja intensidad y pequeño tamaño.

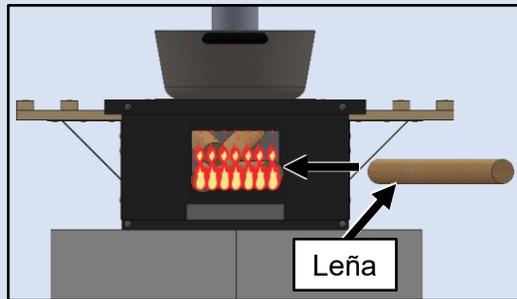


Figura D59 — Atice el combustible cada cierto tiempo para ajustar la intensidad del fuego a la requerida por los alimentos cocinados y agregue más leña en caso de ser necesario.

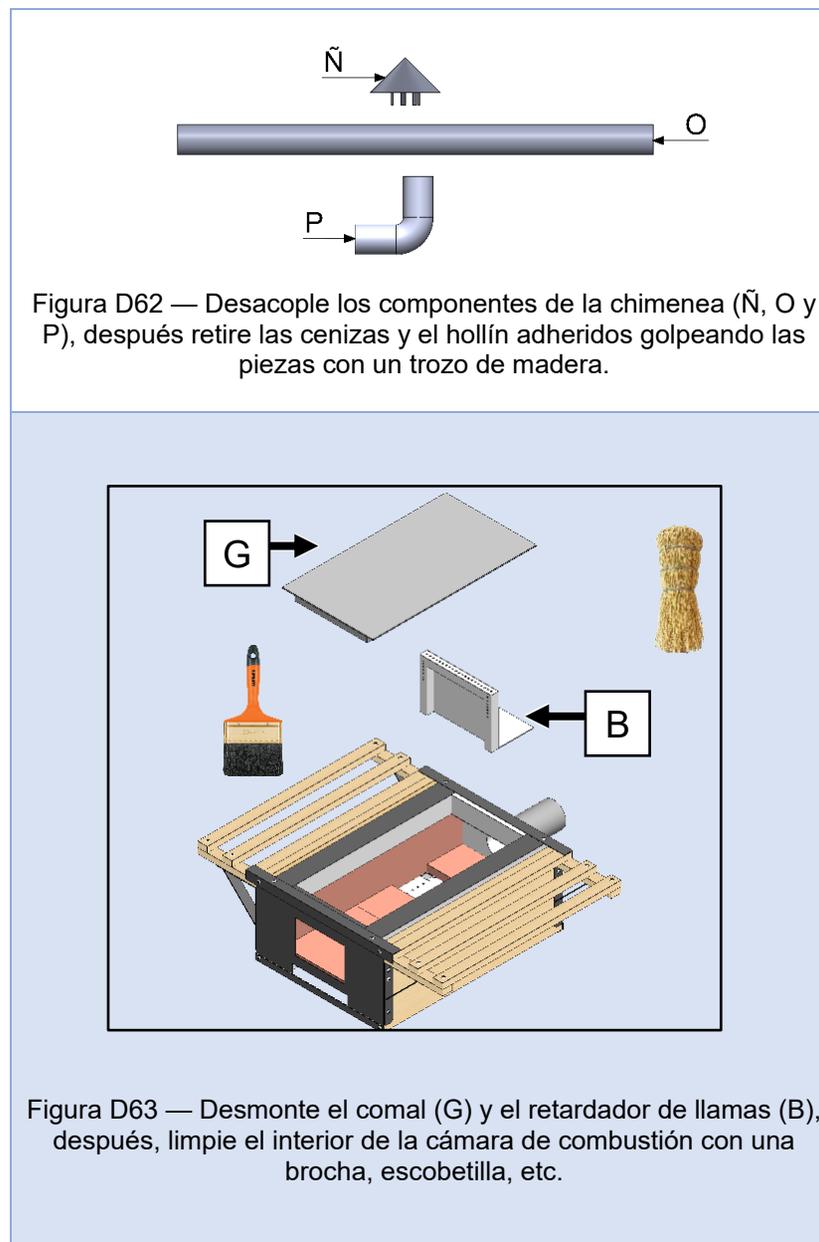
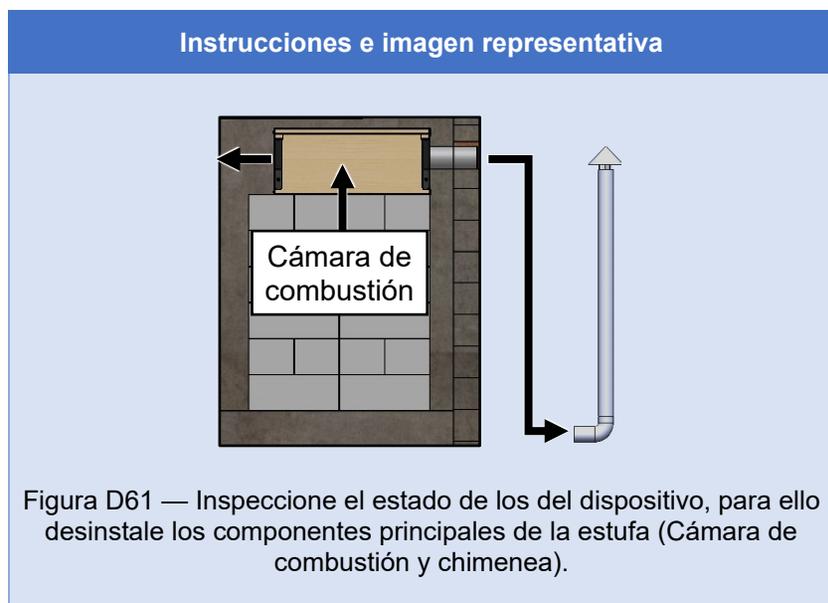


Figura D60 — Al concluir las actividades de cocción retire con cuidado la leña restante de la cámara de combustión y apague las llamas introduciendo el extremo con brasas en un contenedor con arena o grava fina.

## Mantenimiento preventivo

El polvo y las cenizas generadas durante el uso de la tecnología pueden afectar el desempeño del dispositivo con el paso del tiempo. Para evitar esto, se incluye la metodología de mantenimiento preventivo para la estufa Vilma. Es importante señalar que este procedimiento debe realizarse con la estufa a temperatura ambiente, con el fin de evitar accidentes y facilitar el proceso. Además, es fundamental seguir las instrucciones y completar la secuencia de pasos descritos en la tabla A32 para obtener los mejores resultados.

Tabla A32 — Instrucciones de mantenimiento preventivo.



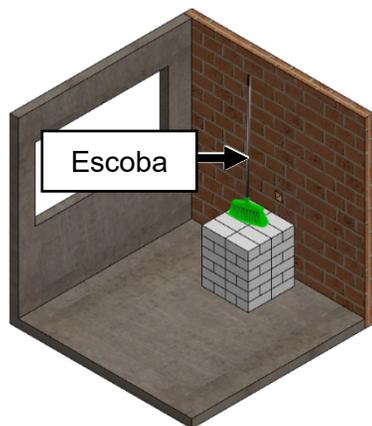


Figura D64 — Desmonte la cámara de combustión de la base, posteriormente, limpie las cenizas y el polvo acumulado sobre la misma empleando una escoba.

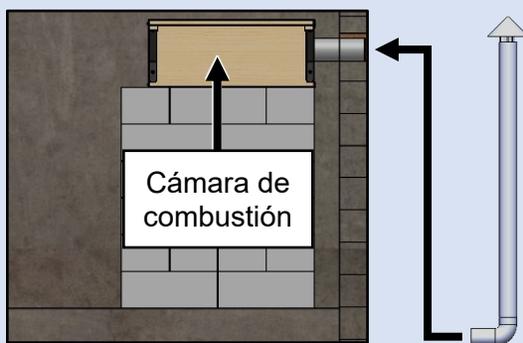


Figura D65 — Coloqué la cámara de combustión en la posición inicial y ensamblé las piezas retiradas (B y G) en su lugar, del mismo modo, se deben conectar las piezas de la chimenea. En caso de ser necesario consulte el procedimiento de instalación.

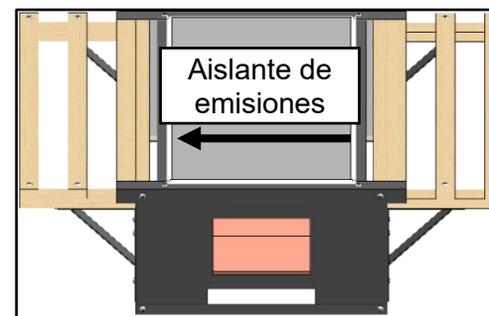


Figura D66 — Selle los espacios entre el comal (G) y la cámara de combustión empleando el procedimiento descrito en la tabla A28.

### Mantenimiento correctivo

El uso continuo de la estufa ecológica provoca desgaste de algunos de los materiales que constituyen el dispositivo. Para estos casos, se incluyen los procedimientos de mantenimiento correctivo correspondientes.

#### Aislamiento de emisiones de la combustión (humo, hollín, etc.)

En la tabla A33 se presenta la metodología de mantenimiento correctivo para la renovación de la pasta aislante que sella los espacios entre el comal y la cámara de combustión.

Tabla A33 — Instrucciones para la reposición del aislamiento de emisiones de la combustión.

**Instrucciones e imagen representativa**



Figura D67 — Mezcle entre 3 y 4 tazas de cal y/o cenizas con una de agua hasta lograr una consistencia suave y compacta.

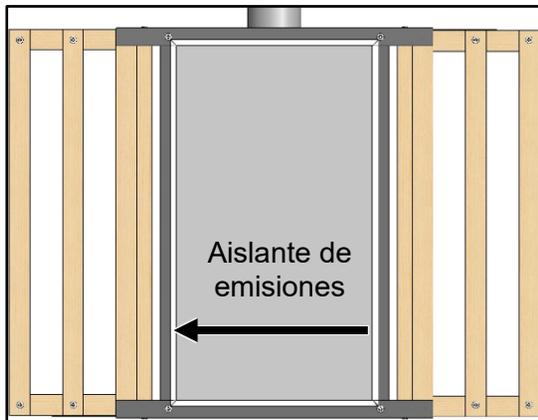


Figura D68 — Aplique la mezcla creada sobre el perímetro del comal y la cámara de combustión, es recomendable aplicar un espesor máximo de 2 cm.

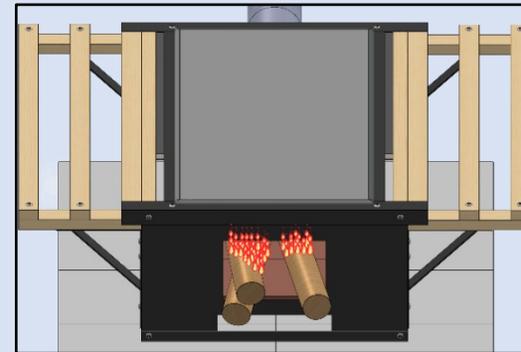


Figura D69 — Inicie la combustión en la estufa para secar y compactar el sello.

**Ladrillos y Petatillos de arcilla cocida**

En la tabla A33 se presenta la metodología de mantenimiento correctivo para la renovación de los ladrillos (ver figura D12) y petatillos (ver figura D14) de arcilla del interior de la cámara de combustión.

Tabla A34 — Instrucciones para la reposición de ladrillos y petatillos.

Instrucciones e imagen representativa

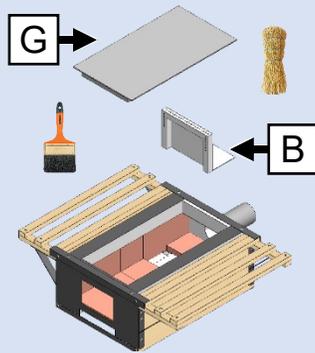


Figura D70 — Desmonte el comal (G) y el retardador de llamas (B) de la cámara de combustión.

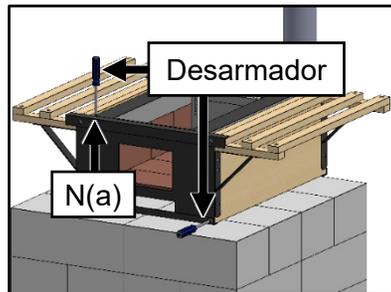


Figura D71 — Retire los tornillos (N) que sujetan los ángulos de acero a la cubierta frontal (H) o posterior de acero (I) y las paredes laterales de madera (J) de la cámara de combustión. Para el caso de los petatillos (F) en la base de la estructura central (A) omita este paso.

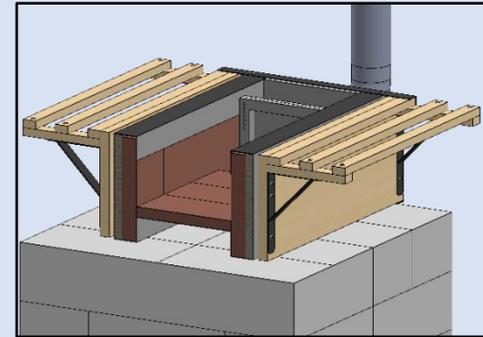


Figura D72 — Retire los ángulos de acero (M) y la cubierta seleccionada (H o I). Para el caso de los petatillos (F) omita este paso.

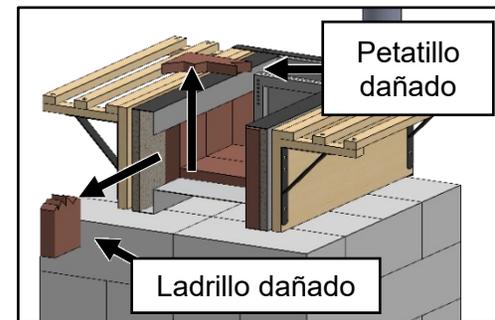


Figura D73 — Retire los ladrillos (D) o petatillos (F) en mal estado, para facilitar este proceso puede utilizar una palanca (varilla, cincel, entre otros).

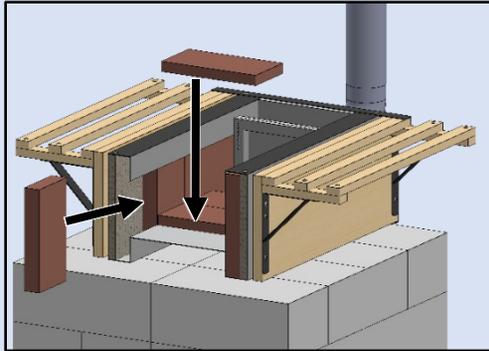


Figura D74 — Reemplace los ladrillos (D) o petatillos (F) dañados por otros con las mismas características.



Figura D76 — Selle los espacios entre la cámara de combustión y el comal (G) empleando las pastas sugeridas en la tabla A33.

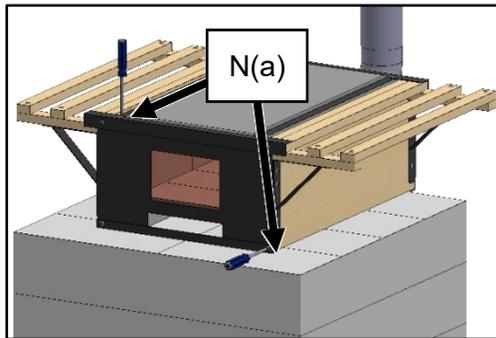


Figura D75 — Coloque las piezas retiradas (B, G y N) en su posición inicial.



Figura D77 — Inicie la combustión en la estufa para secar y compactar el sello.

## Paredes externas y soportes de madera

En la tabla A35 se presenta la metodología de mantenimiento correctivo para la renovación de las paredes aislantes de madera (ver figura D26) en los laterales de la cámara de combustión.

Tabla A35 — Instrucciones para la reposición de paredes externas de madera.

### Instrucciones e imagen representativa



Figura D78 — Retire los tornillos (N) que sujetan los ángulos de acero (M) y las cubiertas (H e I) a las paredes laterales de madera (J).

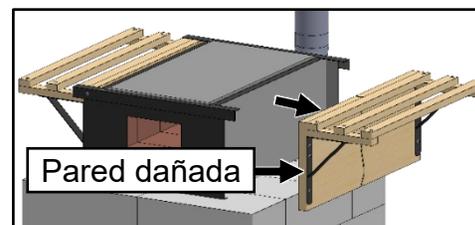


Figura D79 — Retire las paredes de madera dañadas (J).



Figura D80 — Retire los tornillos (N) que sujetan las ménsulas (L) a las paredes de madera dañadas (J).

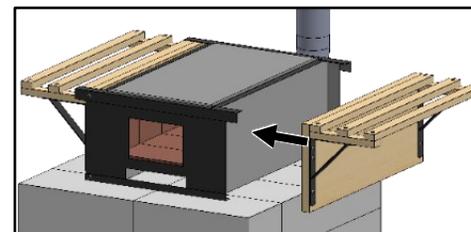


Figura D81 — Reemplace las paredes dañadas (J) por otras con las mismas características.



Figura D82 — Coloque los tornillos (N) y las piezas desmontadas (J, H, I y L) en su posición inicial.

### Chimenea

En la tabla A36 se presenta la metodología de mantenimiento correctivo para la renovación de las piezas de la chimenea (ver figuras D41, D42 y D43).

Tabla A36 — Instrucciones para la reposición de la chimenea.

#### Instrucciones e imagen representativa

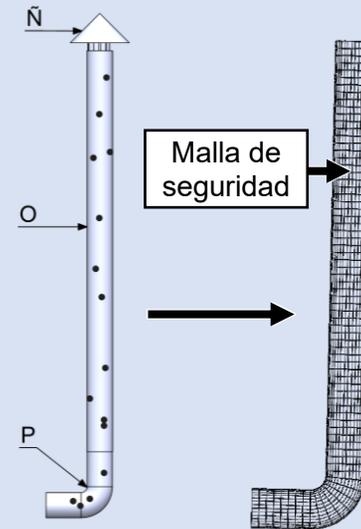


Figura D83 — Retire las protecciones de la chimenea.

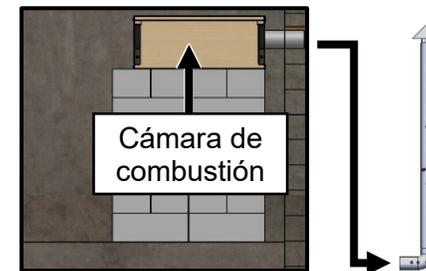


Figura D84 — Desacople la chimenea dañada de la cámara de combustión.

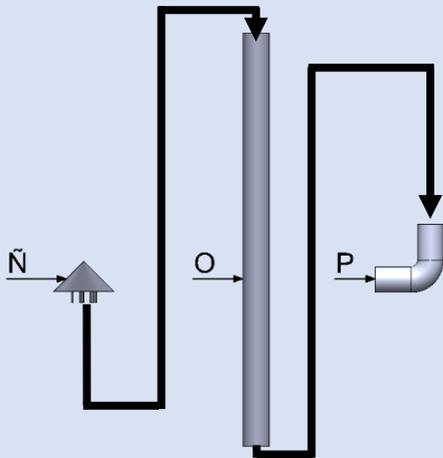


Figura D85 — Acople las piezas de la nueva chimenea (Ñ, O y P).

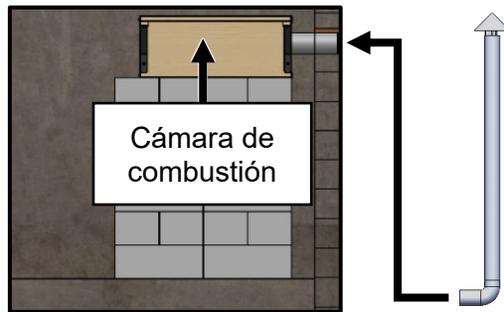


Figura D86 — Acople la nueva chimenea a la cámara de combustión.

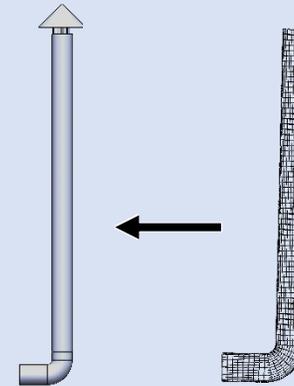


Figura D87 — Coloqué las protecciones de la chimenea.

### Recomendaciones de uso y manejo de combustibles

Para facilitar la operación y obtener el mejor rendimiento posible al utilizar la tecnología descrita en este manual, se sugiere tener en cuenta los siguientes consejos sobre el manejo de los combustibles y el uso de la estufa.

#### Manejo de combustibles

Se debe secar la leña recién adquirida durante un período aproximado de 6 meses, especialmente cuando se observe que tiene un color verde o marrón claro intenso al retirar

la corteza, o cuando se siente pesada y dificulte el proceso de combustión. Para ello se recomienda seguir el siguiente procedimiento.

1. Corte la leña en pequeños trozos que no obstruyan el ingreso de aire ni sobresalgan en exceso de la entrada de la cámara de combustión, como se observa en la figura D89. Es recomendable ajustar las dimensiones del combustible a un grosor máximo de 5 cm y a una longitud no mayor a 60 cm, como se muestra en la figura D88.

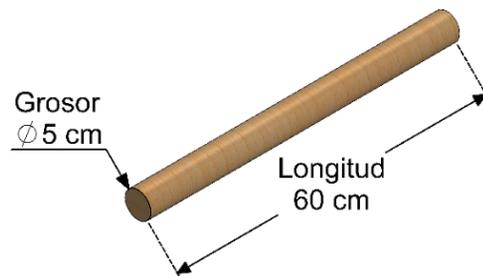


Figura D88 — Imagen representativa de un trozo de leña con las dimensiones recomendadas.

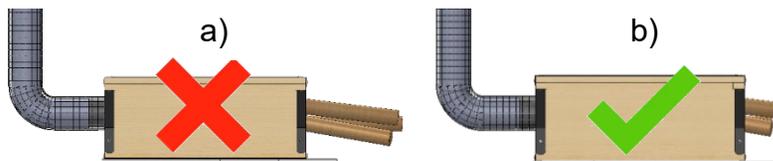


Figura D89 - Imagen representativa de la cámara de combustión empleando leña a) con una longitud mayor a la sugerida y b) con la longitud recomendada.

2. Seque la leña formando torres sobre un suelo seco e impermeable, dentro de un espacio techado. Para ello, coloque las piezas de leña horizontalmente, separadas por al menos 4 cm. Luego, repita el proceso apilando nuevas hileras en dirección perpendicular a las anteriores, como se muestra en la figura D90. Se recomienda cambiar la posición de la leña apilada al menos dos veces al mes para lograr un secado más uniforme.

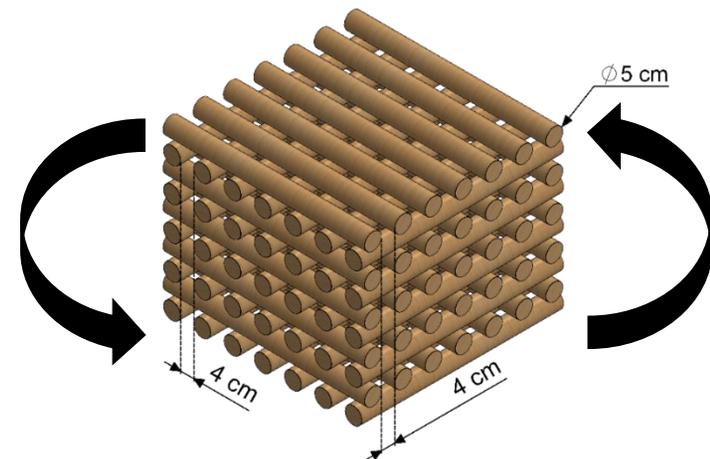


Figura D90 — Imagen representativa de una torre de leña compuesta por 10 capas de 7 piezas con rotación constante en la posición de la leña.

3. Concluido lo anterior, evite mojar la leña y dejarla al aire libre. Para ello, se recomienda almacenarla en un espacio seco y techado, como se muestra en la figura D91. Además, se debe cubrirla con cubiertas impermeables (lonas, plásticos, etc.) sobre un suelo seco, ya sea de madera o concreto.

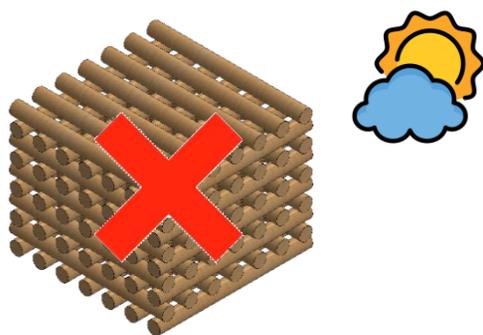


Figura D91 — Imagen representativa de una torre de leña al aire libre.

Es importante considerar que el tiempo de secado de la leña dependerá de las características del combustible utilizado y de las condiciones climáticas de la zona.

### Uso de la tecnología

Para evitar futuros problemas de funcionamiento y dificultades durante la operación del dispositivo, se deben seguir las recomendaciones descritas a continuación.

1. Utilice cortezas secas de leña humedecidas con alcohol como iniciador de la combustión, como se muestra en la figura D92.

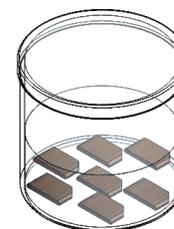


Figura D92 — Imagen representativa de un frasco con alcohol y cortezas de leña.

2. Retire el exceso de polvo y las cenizas del interior de la cámara de combustión antes de utilizar el dispositivo. Para ello, introduzca una brocha o escobetilla por la entrada del componente en la cubierta frontal y empuje los residuos hacia afuera, como se muestra en la figura D93.

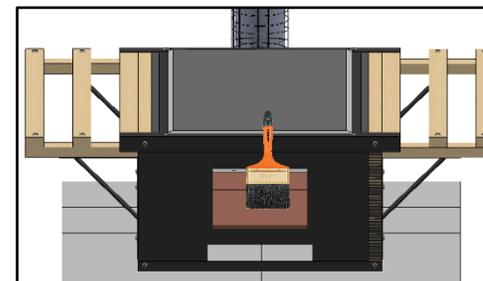


Figura D93 — Imagen representativa de la limpieza de cenizas previo al uso de la estufa.

3. Evite obstruir la entrada de la cámara de combustión debido al ingreso excesivo de combustible y al uso de leños con grosores mayores a los recomendados.
4. Ajuste la cantidad de combustible utilizada de acuerdo con el tipo de alimento que se desee cocinar. Para aprovechar al máximo el calor generado, se recomienda seguir las indicaciones de la figura D94.

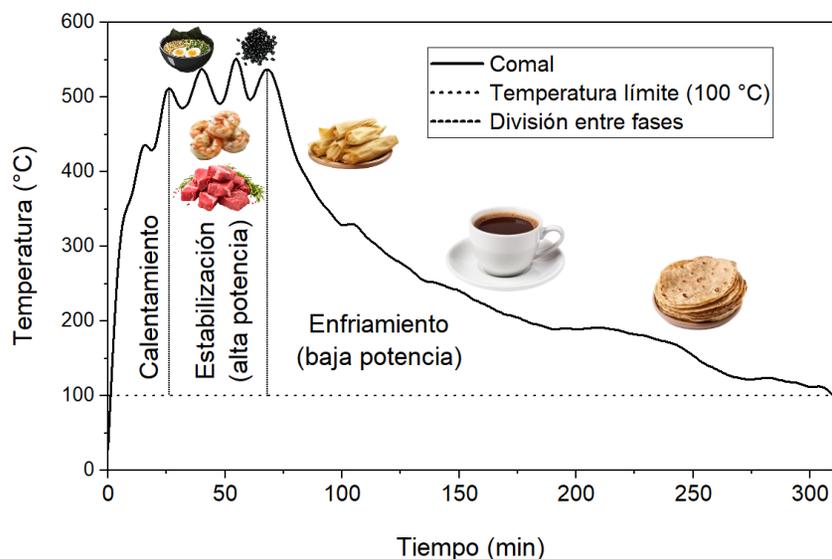


Figura D94 — Curva de comportamiento térmico del comal en función del tiempo.

La figura D94 presenta la curva del comportamiento térmico del comal de la estufa ecológica Vilma. Esta se divide en las fases de calentamiento, estabilización (alta potencia) y enfriamiento (baja potencia), de acuerdo con la temperatura. Considerando lo anterior, se recomienda aprovechar las temperaturas máximas de la etapa de alta potencia para cocinar alimentos con alto contenido de agua, como caldos, sopas, frijoles parados, lentejas, entre otros. Asimismo, se sugiere ajustar la temperatura de cocción de los alimentos húmedos y secos (res, pescados, camarones, aves, frutas, verduras, etc.) a un nivel moderado, con el fin de conservar la mayor cantidad posible del aporte nutricional y evitar la formación de sustancias cancerígenas debido a su carbonización o quemado [164, 165]. Por otro lado, se aconseja utilizar la etapa de baja potencia únicamente para mantener la temperatura o recalentar los alimentos.

5. Evite obstruir, por cualquier motivo, los orificios ubicados en la pared inferior de la estructura central (ver figura D7) y la entrada al conducto auxiliar de circulación de aire (ver figura D8).

6. Evite mojar la leña para apagar el fuego al finalizar las actividades de cocción.

### **Posibles problemas y soluciones**

1. **¿Por qué el humo generado al cocinar en la estufa Vilma es expulsado por la entrada de la cámara de combustión?**

#### **Posibles Causas:**

- a. Las ráfagas de viento, especialmente durante la época de lluvias, dificultan el desplazamiento natural del humo por la chimenea hacia el exterior de la cocina.
- b. La presencia de sólidos, como cenizas, hollín y agua de lluvia bloquean el conducto de expulsión de gases y/o la salida de la cámara de combustión.
- c. La combinación de todos los casos mencionados anteriormente.

**Solución:** Ejecute el procedimiento de mantenimiento preventivo y cierre la entrada de combustible.

2. **¿Por qué el humo generado al cocinar escapa por las ranuras en el perímetro del comal?**

#### **Posibles Causas:**

- a. El uso continuo de la estufa y los movimientos durante el traslado ocasionan el desgaste de la pasta que sella las aberturas entre el comal y la cámara de combustión.
- b. Después de realizar el mantenimiento del dispositivo es indispensable renovar la pasta de sellado.
- c. La combinación de todos los casos mencionados anteriormente.

**Solución:** Ejecutar el procedimiento de mantenimiento correctivo para sellar las aberturas entre el comal y la cámara de combustión.

3. **¿Por qué se dificulta o demora el arranque del proceso de combustión?**

#### **Posibles Causas:**

- a. El alto contenido de humedad en la leña dificulta el inicio de la combustión, ya que la energía

contenida en el combustible se utiliza inicialmente para evaporar el agua.

- b. La obstrucción de la entrada de combustible y los orificios en la base de la estructura central limita la circulación del aire necesario para llevar a cabo el proceso de combustión de manera eficiente.
- c. La combinación de todos los casos mencionados anteriormente.

**Solución:** Ejecute el procedimiento de mantenimiento preventivo y siga las recomendaciones para el uso y manejo de combustibles.

#### **4. ¿Por qué la estufa demora más tiempo del habitual en alcanzar la temperatura adecuada para cocinar?**

**Posibles Causas:**

- a. Los ladrillos y petatillos de arcilla absorben el exceso de humedad del ambiente, lo que provoca que parte del calor generado por el combustible se pierda al evaporar la humedad absorbida por estos elementos.

- b. El alto contenido de humedad en la leña reduce la cantidad de energía aprovechable en forma de calor.
- c. La combinación de todos los casos mencionados anteriormente.

**Solución:** Ejecute el procedimiento de mantenimiento preventivo y las recomendaciones para el uso y manejo de combustibles.

#### **5. ¿Cómo puedo regular la temperatura de cocción de los alimentos?**

**Posibles Causas:**

- a. Utilizar poca o demasiada leña afecta la cantidad de calor generado, y, por lo tanto, la temperatura alcanzada al cocinar en la estufa ecológica.

**Solución:** Ajuste la cantidad de leña empleada al cocinar hasta alcanzar la temperatura de cocción adecuada para la receta que esté preparando.

## NORMATIVA DE SEGURIDAD Y FUNCIONALIDAD DE LA ESTUFA

Para prolongar la vida útil de la estufa Vilma, obtener el mejor rendimiento posible, y evitar riesgos para la salud, se recomienda apegarse a la siguiente normativa de seguridad.

1. **Restricción de uso:** La estufa no debe ser utilizada por menores de 15 años ni por personas que no hayan recibido la formación adecuada conforme a este manual de usuario.
2. **Uso de combustibles inapropiados:** Evite el uso de plásticos y líquidos inflamables como combustibles, ya que estos generan contaminantes nocivos para la salud y el medio ambiente.
3. **Seguridad en la chimenea:** Coloque un letrero y una malla de seguridad alrededor de la chimenea para evitar accidentes.
4. **Temperaturas elevadas:** Durante y después del uso, los componentes metálicos (como el comal, la chimenea y las cubiertas frontal y posterior) alcanzan y mantienen temperaturas elevadas durante varias horas. Se debe tener especial cuidado para evitar quemaduras, especialmente en los niños.
5. **No modificar la estructura:** No intente modificar la estructura de este dispositivo (materiales, dimensiones o forma), ya que esto puede afectar su desempeño y funcionamiento.
6. **Ubicación adecuada:** No instale la estufa cerca de combustibles volátiles (como gas LP, gasolina, diésel, entre otros), electrodomésticos, contactos eléctricos ni al aire libre.
7. **Ventilación y expulsión de gases:** Nunca cierre las entradas auxiliares de aire ni el ducto de expulsión de humo, ya que esto podría comprometer la combustión y el rendimiento de la estufa.
8. **Mantenimiento seguro:** No realice ningún tipo de mantenimiento cuando la estufa esté caliente o en funcionamiento.
9. **Evitar derrames de agua:** Nunca arroje ni derrame agua sobre la estufa, ya que esto puede dañarla o causar un accidente.
10. **Inspección regular:** Inspeccione al menos una vez por semana el estado de los componentes de la estufa para asegurarse de que se encuentren en buenas condiciones de funcionamiento.