



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO  
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE  
MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA  
A LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA

EN CODIRECCIÓN:

DR. JOSÉ AURELIO SOSA OLIVIER

VILLAHERMOSA, TABASCO. FEBRERO 2026

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 13 de febrero de 2026, la que suscribe **Mairé Paulina Torres García** alumna del Programa de Lic. en Ingeniería Ambiental con número de matrícula 202G24112 adscrita a la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentado para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, titulado "HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ENERGÍA ELÉCTRICA" dirigido por él Dr. José Ramón Laines Canepa y él Dr. José Aurelio Sosa Olivier.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 13 de febrero de 2026.



---

Mairé Paulina Torres García



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026  
Margarita  
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 16 de Febrero de 2026


**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: "**HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLASTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ENERGÍA ELÉCTRICA**".

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADEMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado





UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020  
Margarita  
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

FEBRERO 16 DE 2026

**C. MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA**  
**PAS. DE LA LIC. ING. AMBIENTAL**  
**P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ENERGÍA ELÉCTRICA"**, asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa y Dr. José Aurelio Sosa Olivier, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Dr. José Ramón Laines Canepa, QBP. Leonardo García Hernández y Dra. Rosalinda Frías de la O.

**A T E N T A M E N T E**  
**ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.

**División Académica de Ciencias Biológicas  
DIRECCIÓN**

13 de febrero de 2026

**C. MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA**  
Pas. de la Lic. en Ing. Ambiental  
Presente

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ENERGÍA ELÉCTRICA.**

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>0 %</b>
	<b>44 páginas y 10476 palabras</b>

Finalmente, se le solicita a la **C. MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
DIRECTOR


UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p. Dr. José Ramón Laines Canepa. Director de trabajo recepcional  
C.c.p. Dr. José Aurelio Sosa Olivier. Codirector de trabajo recepcional  
C.c.p. Archivo

KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA  
VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO, MEX.

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

 Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

# MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA

## HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ...

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:556481651

Fecha de entrega

12 feb 2026, 10:50 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 feb 2026, 11:00 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

MAIRÉ PAULINA TORRES GARCÍA\_TR tesis.pdf

Tamaño del archivo

1.9 MB

44 páginas

10.476 palabras

63.792 caracteres

# 0% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- ▶ Abstract
- ▶ Trabajos entregados

## Exclusiones


- ▶ N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad




### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
98 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

### Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
  - 0%  Publicaciones
  - 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)
- 

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 12 de febrero de 2026

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTORA en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **HORNO DE BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERAS PLÁSTICAS: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA A LA ENERGÍA ELÉCTRICA** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES



Mairé Paulina Torres García



Dr. José Ramón Laines Canepa

### TESTIGOS



Moises Vallejo Gómez



Kenia Leticia Utrera Cabrera

## **DEDICATORIA**

Esta investigación está dedicada a las personas más importantes en mi vida, a mis dos grandes pilares que me han acompañado, respaldado y guiado siempre: mi papá Manuel y mi mamá Irene, quienes me han apoyado en cada una de mis decisiones y gracias a quienes cuento con las herramientas indispensables para mi formación: la educación, los valores y el deseo constante de superación. Sus palabras de aliento en los momentos de duda, su confianza incondicional y su presencia constante han sido la fuerza que me impulsó a no rendirme y a creer en mis capacidades incluso cuando el camino parecía incierto.

A mi abuelito Federico, quien ha sido mi ejemplo a seguir, siempre presente con su apoyo y compañía; una persona admirable, a quien le tengo un profundo amor y respeto.

A las personas que hoy no están físicamente, pero permanecen en mi corazón: mi mamá Carmita y mi abuelita Ernestina, porque en los días de frustración o temor les pedía que me iluminaran y me guiaran por el camino correcto.

A mi compañero más fiel, mi perrito Rocky, quien desde el comienzo de mis clases en línea no se perdía ninguna, permaneciendo siempre a mi lado. Su presencia fue un refugio en los momentos de estrés; bastaba con abrazarlo para encontrar calma y continuar con mayor serenidad este proceso.

A mí, porque este logro no marca un final, sino el comienzo de mi vida profesional; gracias a las bases que he construido, he superado y seguiré superando los desafíos que la vida ponga en mi camino.

Y a Dios, quien ha llenado mi camino de oportunidades y bendiciones, ha iluminado mi mente, me da la fuerza para afrontar cada reto y ha puesto en mi vida a las personas correctas; porque este logro no es solo el resultado de un esfuerzo académico, sino el reflejo de la fe, el amor y la perseverancia que han guiado cada paso de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, mi casa de estudios, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme adquirir los conocimientos, experiencias y valores que hoy respaldan mi desarrollo académico.

De manera especial, agradezco al Dr. José Ramón Laines Canepa, por su dirección, orientación y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Su mentoría fue fundamental para fortalecer mi formación académica y profesional; su confianza, exigencia y compromiso fueron clave en cada etapa del proceso.

A mi comité sinodal: al Dr. Roberto Barajas, al Q.B.P. Leonardo García, a la Dra. Melina Uribe y a la Dra. Rosalinda, por el tiempo, la disposición y la atención brindada en la revisión de este trabajo, así como por sus valiosas observaciones y aportaciones, las cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento y mejora de esta investigación.

A mis compañeros Alberto, Giovanni, Paola y Kenia, por su apoyo durante la fase experimental, por su disposición, colaboración y trabajo en equipo, que contribuyeron significativamente al desarrollo de este proyecto.

Y finalmente, a quien estuvo en todo momento con su apoyo incondicional, mi novio Moisés, gracias por tu paciencia, comprensión y por creer en mí incluso en los días más difíciles. Tu amor, tus palabras de aliento y tu confianza en mis capacidades fueron un sostén fundamental durante todo este proceso. Gracias por caminar a mi lado en cada etapa y recordarme siempre la fuerza que llevo dentro. Este logro también es parte tuya, porque sin tu apoyo el camino no habría sido el mismo.

## Índice

1	Resumen .....	16
2	Abstract .....	16
3	Introducción .....	17
4	Marco Teórico .....	19
4.1	Conceptos clave .....	19
4.1.1	Biogás: Definición y aplicaciones .....	19
4.1.2	Tecnología de oxidación térmica .....	19
4.1.3	Principios de la oxidación térmica para reducir emisiones .....	19
4.1.4	Plásticos reciclados y su impacto ambiental .....	20
4.1.5	Maderas plásticas: Definición y usos .....	20
4.2	Proceso de fabricación de maderas plásticas .....	21
4.2.1	Materias primas para maderas plásticas .....	22
4.2.2	Técnicas de procesamiento de plásticos reciclados .....	22
4.3	Aplicaciones energéticas e industriales del biogás .....	24
4.4	Eficiencia energética y ventajas del biogás en la producción de maderas plásticas .....	24
5	Justificación .....	26
6	Pregunta de investigación .....	27
7	Hipótesis .....	27
8	Objetivos .....	27
8.1	Objetivo General .....	27
8.2	Objetivos específicos .....	27
9	Metodología .....	28
9.1	Cuantificación del volumen y el flujo de biogás requeridos en el proceso de fundición de polipropileno en el horno. (Objetivo 1) .....	28
9.1.1	Sistema experimental: Descripción del horno piloto adaptado para energía dual (eléctrica y biogás). .....	28
9.1.2	Instrumentación empleada .....	29
9.2	Producción y suministro de biogás .....	29
9.2.1	Producción de biogás .....	29

9.2.2	Obtención de excretas .....	29
9.2.3	Alimentación del biodigestor con excretas. ....	30
9.3	Obtención y preparación del material .....	32
9.3.1	Selección del polipropileno reciclado.....	32
9.3.2	Limpieza y acondicionamiento de moldes .....	32
9.3.3	Tamizado de pellets de polipropileno reciclado.....	33
9.4	Cuantificación del biogás .....	34
9.4.1	Conexión del caudalímetro en la línea de alimentación.....	34
9.4.2	Cálculo de volumen total de biogás.....	35
9.4.3	Realización de pruebas experimentales.....	35
9.4.4	Monitoreo de temperatura .....	36
9.4.5	Prueba de resistencia a la flexión y compresión. ....	36
9.5	Evaluación del desempeño del horno con biogás y energía eléctrica .....	37
9.5.1	Descripción general.....	37
9.5.2	Determinación del consumo eléctrico teórico .....	37
9.5.3	Medición del volumen y flujo de biogás .....	37
9.5.4	Estimación de la energía equivalente del biogás .....	37
9.5.5	Análisis comparativo de energía .....	38
9.5.6	Instrumentación y registros.....	38
9.6	Beneficios ambientales del uso del biogás frente a la energía eléctrica.....	38
9.6.1	Descripción general.....	38
9.6.2	Escenario eléctrico.....	38
9.6.3	Escenario con biogás.....	39
9.6.4	Instrumentación y fuentes de información.....	40
9.6.5	Cálculo del CO <sub>2</sub> biogénico generado por la combustión del metano.....	40
10	Resultados .....	41
10.1	Cuantificación del volumen y el flujo de biogás requeridos en el proceso de fundición de polipropileno en el horno.....	41
10.2	Desempeño del horno operado con biogás frente al uso de energía eléctrica, considerando tiempos de fundición y calidad de las tablas de madera plástica producidas. (Objetivo 2).....	44

10.2.1	Cálculo de la potencia y consumo eléctrico del horno.....	44
10.2.2	Cálculo de la huella de carbono del horno eléctrico.....	44
10.2.3	Cálculo del PCI del Biogás.....	45
10.2.4	Energía liberada por el biogás.....	45
10.2.5	Cálculo de la huella de carbono del biogás.....	46
10.2.6	Conversión a CO <sub>2</sub> equivalente.....	46
10.2.7	CO <sub>2</sub> biogénico.....	46
11	Discusión.....	47
11.1	Evaluación del Desempeño Energético y Viabilidad Técnica (Objetivo 2) .....	47
11.1.1	Sustitución Energética y Criterio de Validación .....	47
11.1.2	Cuantificación del Consumo y Estabilidad del Flujo (Objetivo 1) .....	47
11.2	Propiedades Mecánicas y Contexto del Reciclaje .....	48
11.2.1	Resistencia a la Flexión.....	48
11.2.2	Resistencia a la Compresión como Aporte Novedoso .....	48
11.3	Beneficios Ambientales y Reducción de la Huella de Carbono (Objetivo 3) ..	48
11.3.1	Reducción de Emisiones.....	48
11.3.2	Aprovechamiento del Metano y Carácter Biogénico del CO <sub>2</sub> .....	49
11.4	Aporte a la Economía Circular .....	49
12	Conclusiones.....	50
12.1	Viabilidad General y Sustitución Energética .....	50
12.2	Desempeño Técnico y Cuantificación del Biogás (Objetivos 1 y 2) .....	50
12.3	Propiedades Mecánicas y Calidad del Producto.....	50
12.4	Beneficios Ambientales y Reducción de la Huella de Carbono (Objetivo 3) ..	51
13	Referencias bibliográficas .....	52

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema de proceso de reciclaje primario. Fuente: Elaboración propia a partir de SEMARNAT, (2020).....	23
Figura 2. Esquema de proceso de reciclaje secundario. Elaboración propia a partir de SEMARNAT, (2020).....	23
Figura 3. Horno a biogás ubicado en el área de CATRE-DACBiol. ....	28
Figura 4. Biodigestor ubicado en área de CATRE- DACBiol. ....	29
Figura 5. Recolección de excretas de Búfalo en Ranchería Buena Vista Río Nuevo 4a Sección.....	30
Figura 6. Alimentación de biodigestor.....	30
Figura 7. Bomba de succión de transferencia de agua.....	31
Figura 8. Recirculación del biodigestor. ....	31
Figura 9. Planta Piloto 3 desde ángulo picado. ....	32
Figura 10. Molde aceitado y pellets de polipropileno reciclado.....	33
Figura 11. Tamiz de 4,76mm. ....	34
Figura 12. Caudalímetro instalado en la línea de suministro.....	34
Figura 13. Medidor de volumen utilizado para biogás. ....	35
Figura 14. Termocámara MAKKA utilizada para registro de temperatura. ....	36

## Índice de tablas

Tabla 1. Etapas de la fabricación de maderas plásticas.....	21
Tabla 2. Volumen y flujo de caudal del biogás utilizado en la elaboración de las tablas plásticas.....	41
Tabla 3. Volumen y flujo de caudal del biogás utilizado en la elaboración de los cilindros plásticos.....	42
Tabla 4. Cálculo de resistencia a la flexión.....	43
Tabla 5. Cálculo de resistencia a la compresión.....	43

## 1 Resumen

Esta investigación evalúa la viabilidad técnica y ambiental del uso de biogás como fuente de energía para la fundición de polipropileno reciclado (rPP) en la fabricación de maderas plásticas, en sustitución del consumo eléctrico convencional. El problema central abordado es la acumulación masiva de residuos plásticos y el desaprovechamiento del biogás como alternativa energética sostenible para reducir la dependencia de combustibles fósiles. La metodología consistió en la adaptación de un horno eléctrico mediante la instalación de un quemador tipo estrella alimentado con biogás generado a partir de excretas de búfalo. Se fabricaron tablas de madera plástica cuantificando un consumo promedio de 622 L de biogás con un flujo constante de 7 L/min. Los resultados muestran una resistencia promedio a la flexión de 98.10 kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia a la compresión de 163.40 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual representa un aporte novedoso en el estudio del polipropileno reprocesado. Ambientalmente, la sustitución energética logró una reducción de la huella de carbono superior al 90%, pasando de 2.77 kg CO<sub>2</sub>e en el escenario eléctrico a 0.00073 kg CO<sub>2</sub>e con biogás. Se concluye que el sistema es técnica y ambientalmente factible, promoviendo la economía circular al transformar residuos orgánicos y plásticos en productos funcionales de larga vida útil.

## 2 Abstract

This research evaluates the technical and environmental feasibility of using biogas as an energy source for melting recycled polypropylene (rPP) to manufacture plastic wood, replacing conventional electricity consumption. The core problem addressed is the massive accumulation of plastic waste and the underutilization of biogas as a sustainable energy alternative to reduce fossil fuel dependency. The methodology involved adapting an electric oven by installing a star-type burner fueled by biogas generated from buffalo manure. Plastic wood boards were manufactured, quantifying an average consumption of 622 L of biogas with a constant flow of 7 L/min. The results show an average flexural strength of 98.10 kg/cm<sup>2</sup> and a compressive strength of 163.40 kg/cm<sup>2</sup>, which represents a novel contribution to the study of reprocessed polypropylene. Environmentally, the energy substitution achieved a carbon footprint reduction exceeding 90%, dropping from 2.77 kg CO<sub>2</sub>e in the electric scenario to 0.00073 kg CO<sub>2</sub>e with biogas. It is concluded that the system is technically and environmentally feasible, promoting a circular economy by transforming organic and plastic waste into functional, long-lasting products.

**Palabras clave:** Biogás, polipropileno reciclado, madera plástica, huella de carbono, economía circular.

### 3 Introducción

El biogás es una mezcla gaseosa renovable producida mediante la descomposición de la materia orgánica en un sistema anaerobio, compuesto en un 55-77% por metano ( $\text{CH}_4$ ) y en un 19 a 50% por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El biogás contiene gases de efecto invernadero (GEI), con el metano siendo 80 veces más contaminante que el dióxido de carbono lo que contribuye al cambio climático (United Nations Environment Programme, s. f.). A través de la digestión anaeróbica, más del 90% de la energía se convierte en metano, que se vuelve inflamable cuando su concentración supera el 45% (FAO, 2011). El metano se genera en grandes cantidades a partir del estiércol de la ganadería y puede transformarse en un recurso energético limpio mediante el biogás (SADER, 2017).

Según el Informe Inaugural de la Encuesta Global sobre Gases Renovables y con Bajas Emisiones de Carbono 2023, las emisiones de metano, óxido nitroso y gases fluorados están aumentando rápidamente a nivel mundial, con incrementos de 1.8% en metano, 0.9% en óxido nitroso y 5.5% en gases fluorados. Globalmente, la producción de biogás alcanza unos 400 TWh, equivalente al 1% de la producción mundial de gas natural, con un potencial de crecimiento 20 veces mayor, lo que podría reducir 1.5 gigatoneladas de emisiones de  $\text{CO}_2$  (United Nations Environmental Programme, 2023).

Más de la mitad de la producción global de biogás (214 TWh) se genera en Europa, y cerca del 25% en China (87 TWh). Sin embargo, solo el 10% del biogás producido en Europa se convierte en metano apto para inyección en la red de gas natural; el resto se consume en comunidades rurales para la producción de calor y energía (Raso, 2021).

En el continente americano, en 2012 en Estados Unidos se realizaron 586 proyectos de biogás, de los cuales 13 producen metano. Canadá tiene 279 proyectos, de los cuales 14 generan metano. En América Latina, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) señala que la región produce cerca del 40% de los biocombustibles del mundo, y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) ha promovido la producción de biogás en países como Chile (ONU, 2012). En el 3er Foro Biogás México 2023, se destacó que México tiene una baja producción de biogás, con calidad insuficiente y altos costos de importación. Sin embargo, el país cuenta con suficientes residuos orgánicos para aumentar su producción. México también busca que para el año 2040, el 34% de su energía provenga de fuentes renovables, según su Ley de Reforma Energética (SADER, 2017).

En Tabasco, en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, específicamente en la Planta Piloto N.º 3, destinada al tratamiento atmosférico y de residuos sólidos, ha desarrollado un filtro para mejorar la calidad del biogás, removiendo sulfuro de hidrógeno (Esquivel, 2024). Además, se han

realizado otras investigaciones sobre la producción de biogás a partir de excretas de borrego y rumen, así como la estimación del potencial de biogás en granjas lecheras de la región.

Esta investigación evaluó la viabilidad técnica y energética del uso de biogás como fuente alternativa de energía en un horno originalmente eléctrico, adaptado mediante la incorporación de un quemador tipo estrella. La energía térmica generada se destinó al proceso de fundición de polipropileno reciclado para la fabricación de tablas de madera plástica, integrando principios de economía circular y valorización de residuos. Esta propuesta se presenta como una alternativa sostenible, al tiempo que contribuye a la reducción del consumo de energía eléctrica y a la diversificación de la matriz energética mediante el aprovechamiento de fuentes renovables. Asimismo, el desarrollo e implementación del sistema generará beneficios ambientales, tecnológicos e institucionales, al fortalecer prácticas de gestión ambiental, promover la innovación en procesos productivos y fomentar el uso de materiales reciclados en entornos académicos y productivos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México

## 4 Marco Teórico

### 4.1 Conceptos clave

#### 4.1.1 Biogás: Definición y aplicaciones

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , con trazas de otros compuestos como vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Este tipo de gas se produce a través de la digestión anaeróbica, un proceso biológico en el que microorganismos descomponen la materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol o desechos urbanos, en ausencia de oxígeno. Este proceso, además de permitir el tratamiento de residuos, también genera un biocombustible renovable que contribuye a la economía circular y la sostenibilidad energética (FAO, 2023).

Las aplicaciones del biogás son diversas, su uso más común es la generación de calor, donde proporciona energía térmica para diversas actividades, como la calefacción de viviendas, invernaderos o procesos industriales. Además, puede ser empleado para la producción de electricidad mediante motores de combustión interna o turbinas, lo que lo convierte en una opción clave para plantas de cogeneración que producen simultáneamente electricidad y calor. Gracias a su composición rica en metano, el biogás puede también ser refinado y purificado hasta alcanzar una calidad comparable al gas natural, lo que le permite ser utilizado como combustible en vehículos. Estas características lo hacen una fuente energética versátil y renovable, clave en la transición hacia un modelo energético más limpio y sostenible (FAO, 2023).

#### 4.1.2 Tecnología de oxidación térmica

Este proceso consiste en la oxidación de gases combustibles y compuestos odoríferos a través de una corriente de gas residual. Al elevar la temperatura de la mezcla de contaminantes, se logra alterar su composición química, lo que permite alcanzar una mayor eficiencia en su eliminación y cumplir con los parámetros ambientales establecidos (LGPGIR, 2023).

#### 4.1.3 Principios de la oxidación térmica para reducir emisiones

La oxidación térmica se logra al incrementar la temperatura de los gases y mantenerlos a niveles elevados durante un tiempo determinado, lo que permite que la reacción de oxidación se complete de manera eficiente. Esta técnica se utiliza ampliamente en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (COV),

los cuales se transforman en productos más inocuos como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Además, es eficaz para tratar compuestos inorgánicos, tales como el monóxido de carbono  $\text{CO}$ , el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{NH}_3$ , entre otros. La oxidación térmica es un proceso clave en la reducción de contaminantes atmosféricos, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y al control de emisiones industriales (Envirolia, s/f).

#### 4.1.4 Plásticos reciclados y su impacto ambiental

El plástico está compuesto de resinas, polímeros, proteínas y otras sustancias químicas que lo hacen fácil de manipular y moldear. Existen diferentes tipos de plásticos, y entre ellos, el Tereftalato de polietileno (PET), el cual, tiene la mayor tasa de reciclaje, alcanzando un 56%, mientras que el Polipropileno (PP) tiene una tasa significativamente menor, de apenas 9% (SEMARNAT, 2020).

El plástico es un material asequible y duradero, presente en prácticamente todos los aspectos de la vida moderna, desde envases hasta prendas de vestir. Sin embargo, su desecho masivo y el hecho de que no sea biodegradable han provocado una acumulación crítica en el medio ambiente. Actualmente, se generan más de 430 millones de toneladas de plásticos al año, de las cuales dos tercios terminan contaminando los océanos, degradando los suelos y provocando graves consecuencias para la salud humana. Además, el plástico es un factor importante en la crisis climática (ONU, 2023). En 2023 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reportó que el mundo generó 2,100 millones de toneladas de residuos sólidos, y se prevé que esa cifra aumente a 3,800 millones para 2050. En México, se producen 120,000 toneladas de residuos sólidos cada día, lo que representa más de 43 millones de toneladas al año, de los cuales 5.7 millones son residuos plásticos.

#### 4.1.5 Maderas plásticas: Definición y usos

La madera plástica es un material que presenta una alta resistencia mecánica, además de un ciclo de vida muy largo de aproximadamente 150 años, al ser fabricada de plástico es ideal para uso de mobiliario urbano, cercas, comederos de animales, puertas, macetas, areneros, muebles de jardín, entre otros sectores, como construcción e industria. No requieren un mantenimiento constante, ya que mantiene su color y forma (NOTIAGRO, 2022).

## 4.2 Proceso de fabricación de maderas plásticas

A continuación, se presentan las principales etapas del proceso de fabricación de madera plástica a partir de polipropileno reciclado, describiendo de manera secuencial las operaciones involucradas desde la preparación del material hasta el acabado final del producto.

Tabla 1. Etapas de la fabricación de maderas plásticas.

<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>
<b>Tamizado</b>	Los pellets de polipropileno se tamizan para asegurar una granulometría uniforme, lo que favorece una fusión homogénea.
<b>Preparación del molde</b>	Se limpian y engrasan los moldes metálicos para evitar que el material se adhiera y facilitar el desmoldeado.
<b>Moldeado</b>	Los pellets tamizados se colocan dentro de los moldes, distribuyéndolos de manera uniforme según el tamaño y espesor de la pieza deseada.
<b>Horneado</b>	Los moldes con polipropileno se introducen en el horno a biogás adaptado en este trabajo, donde el material se funde gracias a un calentamiento uniforme.
<b>Prensado-Enfriado</b>	Una vez fundido, el material se somete a presión controlada y se deja enfriar, consolidando una estructura compacta y resistente.
<b>Desmoldeado</b>	Cuando la pieza se encuentra sólida, se retira cuidadosamente del molde para evitar deformaciones.
<b>Lijado</b>	La superficie se lija para obtener una textura uniforme y eliminar imperfecciones superficiales.
<b>Resanado</b>	En caso de presentar defectos o burbujas, se aplican resanes para mejorar la calidad del producto final.
<b>Acabado final</b>	Se revisa la pieza y se le da el acabado estético final, como pulido, recorte de bordes o aplicación de detalles, dejándola lista para su uso.

#### 4.2.1 Materias primas para maderas plásticas

La fabricación de maderas plásticas se basa en el aprovechamiento de **polímeros termoplásticos reciclables**, cuya resistencia, durabilidad y estabilidad permiten su transformación en productos de uso prolongado. En este apartado se presentan las principales materias primas empleadas, describiendo sus propiedades generales y su importancia dentro de los procesos de valorización de residuos plásticos.

**Polipropileno:** El polipropileno es un polímero termoplástico ampliamente utilizado debido a su ligereza, resistencia, rigidez y estructura cristalina. Estas propiedades lo posicionan como uno de los plásticos más demandados en el mercado, dada su versatilidad en aplicaciones industriales y comerciales. (Editorial AP, 2024).

**Polietileno:** El polietileno es uno de los polímeros más producidos globalmente por su elevada versatilidad, resistencia mecánica y facilidad de procesamiento. Se presenta en dos tipos principales: el polietileno de baja densidad (PEBD), caracterizado por ser flexible y altamente resistente a impactos, y el polietileno de alta densidad (PEAD) que presenta una mayor rigidez y una estructura más cristalina, gracias a su producción a bajas presiones y temperaturas (Connor, 2023).

**Cloruro de Polivinilo (PVC):** El cloruro de polivinilo es un termoplástico que puede someterse a ciclos de calentamiento y enfriamiento sin sufrir modificaciones químicas. Su resistencia al fuego, baja conductividad térmica y capacidad para soportar la mayoría de los ácidos, bases y sales lo hacen ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Sin embargo, su durabilidad y resistencia a la degradación representan un reto significativo para su disposición final (Connor, 2023a).

#### 4.2.2 Técnicas de procesamiento de plásticos reciclados

Según el Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, existen varios tipos de procesos de reciclaje (SEMARNAT, 2020):

- Reciclaje Primario (o reciclaje insitu) se refiere a la reincorporación de residuos plásticos de origen postindustrial en el proceso de producción sin

alterar sus propiedades originales. Este tipo de reciclaje ocurre directamente en el lugar donde se generan los residuos (Figura 1).

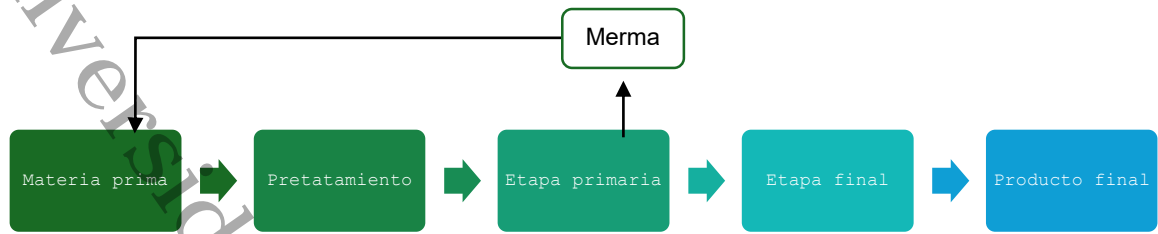


Figura 1. Esquema de proceso de reciclaje primario. Fuente: Elaboración propia a partir de SEMARNAT (2020)

- Reciclaje Secundario implica la recuperación de plásticos industriales o posconsumo sin modificar su estructura química ni composición. Los materiales pueden ser sometidos a tratamientos térmicos o adaptados según la tecnología disponible, manteniendo sus características esenciales (Figura 2).



Figura 2. Esquema de proceso de reciclaje secundario. Elaboración propia a partir de SEMARNAT, (2020)

- Reciclaje Terciario, también conocido como despolimerización, transforma la estructura molecular de los residuos plásticos para crear nuevos compuestos que pueden utilizarse como materia prima o combustible. Este proceso se lleva a cabo mediante técnicas térmicas como la pirólisis, gasificación, hidrogenación y fragmentación, con un control preciso del oxígeno y el uso de catalizadores para optimizar los resultados.
- Reciclaje Cuaternario se basa en la recuperación de la energía calorífica contenida en los residuos plásticos a través de su combustión en presencia de oxígeno, lo que permite aprovecharlos como combustible. Sin embargo, este proceso genera emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes atmosféricos, lo que debe ser considerado en su implementación.

### 4.3 Aplicaciones energéticas e industriales del biogás.

El aprovechamiento del biogás ha cobrado relevancia en el contexto de la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, debido a su capacidad para transformar residuos orgánicos en energía útil, al tiempo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente mediante la captura y reutilización del metano. Este enfoque favorece una gestión más eficiente de los residuos, disminuyendo impactos ambientales y sanitarios asociados a su disposición inadecuada, y permite además la obtención de subproductos aprovechables, como biofertilizantes, lo que refuerza su valor dentro de esquemas de economía circular (Morocho, 2023).

En el ámbito energético e industrial, el biogás puede emplearse directamente como fuente de energía térmica y eléctrica, o someterse a procesos de purificación para incrementar su valor energético. Mediante la eliminación de impurezas como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, se obtiene biometano, el cual puede acondicionarse para cumplir especificaciones similares a las del gas natural, permitiendo su uso en procesos industriales, su inyección en redes de distribución o su aplicación en el sector transporte. Este aprovechamiento integral permite maximizar el potencial energético de los residuos orgánicos y fortalece el papel del biogás como alternativa viable en la transición hacia sistemas energéticos más limpios a diferentes escalas productivas (Zamora, 2024).

### 4.4 Eficiencia energética y ventajas del biogás en la producción de maderas plásticas

La producción de biogás aporta de manera importante a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que permite sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles y, al mismo tiempo, aprovechar el metano que de otro modo se liberaría a la atmósfera. En lugar de dejar que el metano generado por la descomposición de residuos orgánicos se disperse sin control, este gas se captura, se conduce a un sistema de aprovechamiento y se utiliza como combustible, transformando un contaminante de alto potencial de calentamiento global en una fuente de energía útil. Con ello, se mitiga el impacto climático asociado al metano, y disminuye la dependencia de fuentes convencionales de energía y se avanza hacia un esquema más sostenible, circular y respetuoso con el medio ambiente, tanto a escala local como regional (Zamora, 2024).

La madera plástica fabricada a partir de plásticos reciclados se caracteriza por su elevada durabilidad y estabilidad frente a agentes ambientales, como la humedad, la corrosión y la acción biológica, lo que permite su uso en aplicaciones de larga

vida útil. En comparación con la madera convencional, presenta menores requerimientos de mantenimiento, ya que no requiere tratamientos químicos ni recubrimientos periódicos, y conserva su integridad estructural sin deformaciones significativas. Desde una perspectiva ambiental, este material es reciclable al final de su vida útil, contribuye a la reducción de residuos plásticos y a la disminución de la presión sobre los recursos forestales, promoviendo esquemas de economía circular y una reducción indirecta de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción y sustitución de materiales. (International EPD System, 2023)

México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

## 5 Justificación

El biogás constituye una fuente de energía renovable con alto potencial para sustituir el uso de energías convencionales, como la electricidad proveniente de la red, en distintos procesos industriales. No obstante, su aprovechamiento aún presenta limitaciones y, en muchos casos, no se utiliza de manera eficiente, lo que implica desaprovechar una alternativa estratégica para disminuir la dependencia de combustibles fósiles. La falta de un uso adecuado también reduce la capacidad de esta tecnología para contribuir a la mitigación de emisiones de GEI, cuya reducción resulta prioritaria en el contexto de los compromisos ambientales y de sostenibilidad a nivel global.

En este marco, el presente proyecto se enfocó en la adaptación de un horno originalmente diseñado para operar únicamente con energía eléctrica, incorporando un quemador tipo estrella que permite su funcionamiento con biogás como fuente de calor. El objetivo principal fue evaluar la viabilidad técnica de utilizar esta fuente renovable en la fundición de polipropileno reciclado, verificando que fuera capaz de alcanzar y mantener las condiciones térmicas necesarias para el proceso. Este planteamiento abre la posibilidad de sustituir parcial o totalmente el consumo de energía eléctrica por un recurso disponible localmente; también contribuye a disminuir la huella de carbono asociada al sistema de producción. De esta manera, se fortalece la pertinencia ambiental y la sostenibilidad de la propuesta, al integrar el aprovechamiento de residuos orgánicos y plásticos en un esquema de economía circular.

De manera complementaria, la energía generada a partir de biogás se utilizó en la fabricación de tablas de madera plástica elaboradas con polipropileno reciclado, lo que contribuyó a disminuir la acumulación de residuos plásticos en vertederos y a reducir el riesgo de su dispersión en ecosistemas acuáticos. Con ello, el proyecto aborda de manera integral dos problemáticas ambientales de gran relevancia: por un lado, la gestión adecuada de los residuos plásticos, y por otro, la necesidad de impulsar procesos productivos con mayor sostenibilidad energética.

Este trabajo se inscribe en los principios de la economía circular y en el aprovechamiento de energías renovables, al transformar residuos en productos de utilidad y durabilidad, al mismo tiempo que se promueve la reducción de emisiones contaminantes. De esta manera, se generan beneficios tanto ambientales como sociales, al ofrecer una alternativa viable y replicable para instituciones y comunidades que buscan transitar hacia modelos de producción más limpios, responsables y alineados con los objetivos de sostenibilidad.

## 6 Pregunta de investigación

¿Es técnica y ambientalmente viable la utilización de biogás como fuente de energía en el proceso de fundición de polipropileno reciclado para la fabricación de tablas de madera plástica, en sustitución de la energía eléctrica convencional?

## 7 Hipótesis

El empleo de biogás como fuente de energía en el horno permitirá sustituir de manera efectiva el consumo de energía eléctrica en el proceso de fundición de polipropileno reciclado, garantizando la viabilidad técnica en la producción de tablas de madera plástica y contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en concordancia con los principios de sostenibilidad energética y economía circular.

## 8 Objetivos

### 8.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de biogás como fuente de energía en la fundición de polipropileno reciclado para la fabricación de tablas de madera plástica, en sustitución del consumo de energía eléctrica convencional, con el fin de promover procesos productivos más sostenibles y acordes con los principios de la economía circular.

### 8.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar el volumen y el flujo de biogás requeridos en el proceso de fundición de polipropileno en el horno.
2. Evaluar el desempeño del horno operado con biogás frente al uso de energía eléctrica, considerando tiempos de fundición y calidad de las tablas de madera plástica producidas.
3. Estimar los beneficios ambientales derivados de la sustitución de energía eléctrica por biogás, en términos de la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero.

## 9 Metodología

### 9.1 Cuantificación del volumen y el flujo de biogás requeridos en el proceso de fundición de polipropileno en el horno. (Objetivo 1)

#### 9.1.1 Sistema experimental: Descripción del horno piloto adaptado para energía dual (eléctrica y biogás).

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario adaptar un horno originalmente diseñado para operar con energía eléctrica, el cual contaba con cuatro resistencias ubicadas en sus laterales. Con el propósito de emplear biogás como fuente de energía, se realizaron modificaciones estructurales y de conexión.

Se habilitó un orificio en la parte inferior del horno para la instalación de un quemador tipo estrella, el cual se acopló mediante una manguera de plástico resistente a la presión de trabajo. A esta línea de alimentación se integró una válvula de paso, con la finalidad de regular de manera segura el flujo de biogás durante las pruebas experimentales.

Finalmente, todo el sistema quedó conectado a la red de alimentación de biogás proveniente directamente del biodigestor, lo que permitió la operación continua del horno bajo un esquema de sustitución energética respecto a su configuración eléctrica original.



Figura 3. Horno a biogás ubicado en el área del Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE)-DACBio.

### 9.1.2 Instrumentación empleada

Para el monitoreo y control de las variables experimentales se utilizaron diferentes instrumentos. El flujo del biogás se mantuvo constante y se registró mediante un caudalímetro, mientras que el volumen total consumido en cada prueba fue cuantificado con un medidor de volumen de biogás. La distribución de temperatura, tanto en la cámara de combustión como en el interior del horno, se evaluó con una termocámara, lo que permitió asegurar un control térmico adecuado durante el proceso de fundición. Finalmente, se empleó una balanza digital para determinar con precisión la masa de polipropileno reciclado antes y después de la fundición, lo que permitió establecer un balance de material confiable.

## 9.2 Producción y suministro de biogás

### 9.2.1 Producción de biogás

El biogás se produjo en un biodigestor ubicado en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol), en el área de CATRE(Figura 4).



Figura 4. Biodigestor ubicado en área de CATRE- DACBiol.

### 9.2.2 Obtención de excretas

El material se recolectó en un rancho ubicado en Buena Vista Río Nuevo, 4<sup>a</sup> Sección, municipio de Centro, Tabasco, zona caracterizada por su actividad ganadera, lo que garantiza un suministro constante de este tipo de sustrato.

Las excretas fueron transportadas en dos contenedores plásticos de 200 L de capacidad cada uno (Figura 5). Una vez en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol), se procedió a

descargar el sustrato en el biodigestor, el cual constituye la unidad experimental donde se generó el biogás empleado en las pruebas del horno piloto.



Figura 5. Recolección de excretas de Búfalo en Ranchería Buena Vista Río Nuevo 4a Sección.

### 9.2.3 Alimentación del biodigestor con excretas.

El biodigestor fue alimentado con un total de 400 kg de excretas de búfalo, seleccionadas por su alto contenido de materia orgánica y humedad (Figura 6), lo que favorece la producción de biogás en el proceso de digestión anaerobia.



Figura 6. Alimentación de biodigestor.

Cada dos semanas se hacía recirculación del biodigestor, para acelerar el proceso que la producción del biogás. Para esto se utilizó una bomba la cual se alimenta con diesel, y un par de mangueras de succión de PVC color verde, de 2" de diámetro nominal, con conexiones macho x hembra de leva y ranura, una presión máxima de operación de 65 psi y 20 pies de longitud (Figura 7). La manguera permitió el retorno controlado del material al interior del biodigestor, favoreciendo la mezcla del sustrato y evitando la sedimentación de sólidos (Figura 8).



Figura 7. Bomba de succión de transferencia de agua.



Figura 8. Recirculación del biodigestor.

## 9.3 Obtención y preparación del material

### 9.3.1 Selección del polipropileno reciclado

El material utilizado en este estudio corresponde a polipropileno reciclado (rPP), adquirido en forma de pélet a través de una empresa local especializada en la transformación de plásticos posconsumo. Esta empresa obtiene el polipropileno de recolectores locales, quienes lo suministran como materia prima para su pasar por el proceso de peletización.

Una vez procesado, el rPP fue transportado y almacenado en el Edificio Multifuncional de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, específicamente en la Planta Piloto N.º 3, destinada al tratamiento atmosférico y de residuos sólidos (Figura 9).



*Figura 9. Planta Piloto 3 desde ángulo picado.*

### 9.3.2 Limpieza y acondicionamiento de moldes

Antes de cada prueba experimental, se llevó a cabo un procedimiento de limpieza y acondicionamiento de los moldes metálicos empleados en la elaboración de las tablas de polipropileno reciclado. En primer lugar, los moldes fueron raspados manualmente con espátulas para remover residuos sólidos de polipropileno adheridos en pruebas anteriores. Posteriormente, se realizó una limpieza con franela y solución jabonosa, con el fin de eliminar restos de aceite o impurezas que pudieran afectar la calidad de las piezas.

Una vez completada esta etapa, los moldes fueron acondicionados mediante la aplicación controlada de una capa delgada de aceite, lo cual actúa como agente desmoldante (Figura 10). Este paso resulta esencial para evitar que el polipropileno se adhiera durante la fundición, garantizando una liberación uniforme de las piezas y preservando tanto la integridad del producto final como la vida útil del molde. Este proceso aseguró la homogeneidad superficial en las tablas obtenidas y permitió minimizar defectos estructurales asociados a residuos o adherencias previas.



Figura 10. Molde aceitado y pellets de polipropileno reciclado.

### 9.3.3 Tamizado de pellets de polipropileno reciclado

Previo a su empleo en los experimentos, los pellets de rPP fueron tamizados con tamices normalizados conforme a la escala ASTM E11 (Standard Test Sieve Series), con aberturas de 4.76 mm (N.º 4). Este procedimiento permitió garantizar una granulometría uniforme, condición necesaria para favorecer una fusión homogénea durante el proceso de fundición en el horno a biogás (Figura 11).



Figura 11. Tamiz de 4.76mm.

## 9.4 Cuantificación del biogás

### 9.4.1 Conexión del caudalímetro en la línea de alimentación.

El sistema de alimentación de biogás se instrumentó con un caudalímetro instalado en la línea de suministro hacia el quemador tipo estrella. Este dispositivo permitió registrar en tiempo real el flujo del caudal de biogás (L/min), asegurando la correcta medición del combustible empleado en cada corrida experimental (Figura 12).

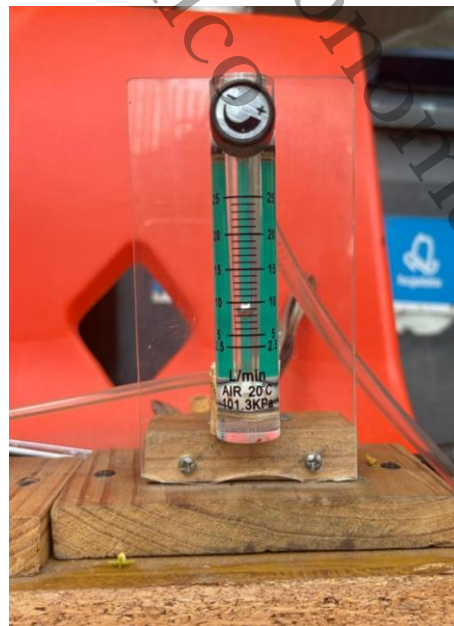


Figura 12. Rotámetro instalado en la línea de suministro.

#### 9.4.2 Cálculo de volumen total de biogás.

El volumen total de biogás consumido se determinó mediante un medidor de volumen instalado en la línea de suministro del biogás, antes del ingreso al sistema de combustión del horno (Figura 13). El medidor permitió registrar el volumen acumulado de biogás suministrado durante cada ensayo experimental.



Figura 13. Medidor de volumen utilizado para biogás.

#### 9.4.3 Realización de pruebas experimentales.

Durante la fase experimental se elaboraron un total de 28 tablas de polipropileno reciclado (rPP), las cuales fueron enumeradas de manera consecutiva conforme a su orden de fabricación. A partir de la tabla número 17, el proceso de elaboración presentó condiciones estables y reproducibles, reflejadas en una correcta liberación del molde, ausencia de adhesión del material a las superficies de moldeo y disminución de defectos visibles, como la presencia de huecos o vacíos en la estructura del material.

Con base en estos criterios, se seleccionaron 6 tablas para la realización de pruebas de resistencia a la flexión y 6 tablas adicionales para el registro y análisis del volumen de biogás consumido durante su fabricación. Asimismo, se elaboraron 6 especímenes cilíndricos de 9 cm de altura y 5 cm de diámetro, los cuales fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión.

#### 9.4.4 Monitoreo de temperatura

Para evaluar la capacidad térmica del horno, en cada prueba se registró con una termocámara infrarroja MAKKA la temperatura máxima alcanzada al minuto 45. Las mediciones se efectuaron en puntos representativos (superficie del molde, pared interna de la cámara y zona de registro) (Figura 14).



Figura 14. Termocámara MAKKA utilizada para registro de temperatura.

#### 9.4.5 Prueba de resistencia a la flexión y compresión.

Para la prueba de resistencia a la flexión se utilizaron las tablas elaboradas, ya que las metodologías estandarizadas para plásticos establecen el uso de especímenes con sección rectangular y relaciones adecuadas entre claro y espesor, con el fin de garantizar que el comportamiento mecánico esté dominado por el momento flector y se minimice la influencia del esfuerzo cortante. Esta configuración permite, además, representar de manera más fiel las condiciones del producto final, correspondiente a las tablas de madera plástica.

Por otro lado, para la prueba de resistencia a la compresión se emplearon especímenes cilíndricos, debido a que esta geometría facilita la aplicación de la carga de forma axial y uniforme entre los platos de la máquina de ensayo, reduciendo concentraciones de esfuerzo en las aristas y errores asociados a desalineaciones. Asimismo, una relación adecuada entre la altura y el diámetro del espécimen permite evitar fenómenos de pandeo y obtener un estado de compresión más representativo, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D695 para polímeros.

## 9.5 Evaluación del desempeño del horno con biogás y energía eléctrica

El presente apartado describe la metodología empleada para el desarrollo del Objetivo 2, enfocado en la sustitución de energía eléctrica por biogás en el horno piloto. El propósito de esta etapa fue evaluar la factibilidad técnica de la adaptación energética, a través de la comparación entre el consumo teórico de electricidad y la energía aportada por el biogás en condiciones experimentales controladas.

### 9.5.1 Descripción general

La metodología consistió en registrar el consumo eléctrico teórico del equipo, medir el volumen de biogás empleado durante la operación del horno y comparar la energía generada por ambas fuentes.

### 9.5.2 Determinación del consumo eléctrico teórico

Se documentaron las especificaciones técnicas del horno, incluyendo la potencia nominal (kW) y la tensión de operación (V). A partir de estos datos se calculó el consumo teórico de energía eléctrica mediante la expresión:

$$E = P(t)$$

*Ecuación 1. Consumo teórico de energía eléctrica.*

Donde  $P$  corresponde a la potencia (kW) y  $t$  al tiempo de operación (h). El valor resultante, expresado en kilovatios-hora (kWh), sirvió como referencia del escenario eléctrico.

### 9.5.3 Medición del volumen y flujo de biogás

Para la evaluación experimental con biogás, se operó el horno piloto adaptado al sistema de combustión de biogás. Se instaló un caudalímetro en la línea de alimentación para registrar el flujo volumétrico de biogás (L/min) y se midió el tiempo total de operación del horno (min). Con estos datos se determinó el volumen total consumido utilizando la ecuación:

$$V = Q(t)$$

*Ecuación 2. Volumen total del biogás consumido.*

Donde  $Q$  representa el caudal (L/min) y  $t$  el tiempo (min). El volumen total se convirtió a metros cúbicos (m<sup>3</sup>) para los cálculos posteriores.

### 9.5.4 Estimación de la energía equivalente del biogás

Con el volumen de biogás medido experimentalmente, se calculó la energía térmica liberada utilizando el poder calorífico inferior (PCI) del biogás, considerando la fracción de metano ( $xCH_4$ ) presente en el combustible. El PCI se determinó mediante

$PCI_{biogás} = 35.8 \times x_{CH_4} (MJ/Nm^3)$ . La energía total generada se obtuvo con la expresión:

$$E = V \times PCI_{biogás}$$

*Ecuación 3. Energía total del biogás generada.*

expresada en megajulios (MJ) y convertida posteriormente a kilovatios-hora (kWh) para su comparación con el escenario eléctrico.

#### 9.5.5 Análisis comparativo de energía

Con los valores obtenidos de ambos escenarios, se realizó una comparación directa entre el consumo eléctrico teórico y la energía térmica del biogás. Esta comparación permitió evaluar si el biogás proporciona la energía suficiente para mantener la operación del horno en condiciones equivalentes a las del sistema eléctrico. Asimismo, se consideraron posibles pérdidas térmicas y la eficiencia global del proceso.

#### 9.5.6 Instrumentación y registros

Durante las pruebas experimentales se utilizaron instrumentos como caudalímetro, medidor de volumen, cronómetro y balanza digital para registrar el comportamiento del sistema. Los datos fueron recopilados en una hoja de cálculo diseñada para automatizar los cálculos de energía, conversión de unidades y comparación entre el consumo eléctrico y el biogás.

### 9.6 Beneficios ambientales del uso del biogás frente a la energía eléctrica.

#### 9.6.1 Descripción general

A partir de los datos energéticos obtenidos en el Objetivo 2, se realizó la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en ambos escenarios energéticos. Para ello, se aplicaron factores de emisión específicos reportados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la energía eléctrica y por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) para el biogás. El análisis comparativo permitió determinar el porcentaje de reducción de la huella de carbono alcanzado mediante la sustitución de energía eléctrica por biogás.

#### 9.6.2 Escenario eléctrico

En el escenario eléctrico, las emisiones de  $CO_2$  equivalente ( $CO_2e$ ) se estimaron con base en el consumo teórico de energía (kWh) obtenido en el Objetivo 2 y el factor de

emisión promedio de la red eléctrica nacional, reportado por la CFE y validado por la SEMARNAT. El cálculo se realizó mediante la ecuación:

$$E_e = C(FE)$$

*Ecuación 4. Emisión de CO<sub>2</sub>e*

donde  $E_e$  es la emisión de  $CO_2e$  (kg),  $C$  es el consumo eléctrico (kWh) y  $FE$  es el factor de emisión de la red  $\left(\frac{kg\ CO_2e}{kWh}\right)$ .

### 9.6.3 Escenario con biogás

Para el escenario con biogás, las emisiones se calcularon considerando únicamente los gases de efecto invernadero asociados a la combustión incompleta del biogás, principalmente el metano no quemado y el óxido nitroso. El dióxido de carbono generado se consideró de origen biogénico, por lo que no será contabilizado dentro de la huella de carbono, sino reportado de manera separada. Los factores de emisión utilizados corresponden a los valores del (IPCC, 2006; IPCC, 2019):

$$CH_4: 1 \frac{kg}{TJ}$$

$$N_2O: 0.1 \frac{kg}{TJ}$$

Las emisiones de cada gas se calcularon en función de la energía térmica del biogás (TJ), y posteriormente se convirtieron a CO<sub>2</sub> equivalente ( $CO_2e$ ) utilizando los potenciales de calentamiento global (GWP) reportados por el IPCC ( $CH_4 = 27, N_2O = 273$ ):

$$E(\text{biogás}) = (CH_4 \times 27) + (N_2O \times 273)$$

*Ecuación 5. Energía térmica del biogás.*

### 7.5.4 Comparación de la huella de carbono

Una vez estimadas las emisiones para ambos escenarios, se realizó la comparación de la huella de carbono total. El porcentaje de reducción de emisiones se determinó mediante la ecuación:

$$\text{Reducción (\%)} = \left(1 - \frac{E(\text{biogás})}{E(\text{eléctrica})}\right) \times 100$$

*Ecuación 6. Porcentaje de reducción de emisiones.*

Este valor permitió cuantificar el beneficio ambiental derivado del uso de biogás frente a la energía eléctrica, demostrando la contribución de la adaptación tecnológica a la mitigación del cambio climático.

#### 9.6.4 Instrumentación y fuentes de información

Los cálculos se realizaron empleando una hoja de cálculo diseñada para automatizar las fórmulas y conversiones entre unidades de energía y emisiones. Las fuentes de información utilizadas incluirán los informes oficiales de la CFE, los Inventarios Nacionales de Emisiones de GEI de la SEMARNAT, así como las Directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2006; IPCC, 2019).

#### 9.6.5 Cálculo del CO<sub>2</sub> biogénico generado por la combustión del metano

Para estimar el dióxido de carbono biogénico liberado durante la combustión del biogás, se aplicó la estequiometría de la reacción de oxidación del metano (CH<sub>4</sub>), siguiendo los lineamientos del IPCC (2006). Primero se determinó la masa de metano requerida para generar la energía calculada a partir del volumen de biogás utilizado. La masa de CH<sub>4</sub> se obtuvo dividiendo la energía liberada entre el poder calorífico inferior del metano (PCI\_CH<sub>4</sub> = 50 MJ/kg), valor recomendado para combustibles gaseosos de origen biogénico:

$$m_{CH_4} = \frac{E}{PCI_{CH_4}}$$

Ecuación 7. Masa de CH<sub>4</sub>

Posteriormente, la masa de dióxido de carbono producida se estimó aplicando la relación estequiométrica de la reacción:



Dado que la razón de masas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> es:

$$\frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} = \frac{44}{16} = 2.75$$

La masa final de CO<sub>2</sub> biogénico se calculó mediante:

$$m_{CO_2} = m_{CH_4} \times 2.75$$

Este CO<sub>2</sub> se considera biogénico, por lo que no se contabiliza como parte de la huella fósil, conforme a las directrices del IPCC.

## 10 Resultados

### 10.1 Cuantificación del volumen y el flujo de biogás requeridos en el proceso de fundición de polipropileno en el horno.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los datos correspondientes al volumen (L) y al flujo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) del biogás utilizado durante la fundición de las maderas y cilindros plásticos. Se observó que para la fabricación de las tablas se requirió un volumen promedio mayor de 622 litros, en comparación con los cilindros, que consumieron 486 litros. Esta diferencia puede atribuirse al mayor volumen de material y superficie de contacto que implican las maderas, lo que demanda un tiempo de exposición térmica más prolongado.

A pesar de esta variación en el volumen, el flujo del caudal se mantuvo constante en ambos casos, con un valor de 7 L/min. Esto indica que, aunque la cantidad total de biogás consumido varió según la pieza fabricada, la estabilidad del flujo fue clave para asegurar una fusión homogénea de los pélets de polipropileno.

*Tabla 2. Volumen y flujo de caudal del biogás utilizado en la elaboración de las tablas plásticas*

Tabla	Volumen de biogás utilizado (L)	Flujo de caudal (L/min)
1	765	7
2	661	7
3	585	7
4	530	7
5	681	7
6	510	7
<b>Promedio</b>	<b>622 ± 98</b>	<b>7</b>

Tabla 3. Volumen y flujo de caudal del biogás utilizado en la elaboración de los cilindros plásticos

Cilindro	Volumen de biogás utilizado (L)	Flujo de caudal (L/min)
1	476	7
2	491	7
3	458	7
4	389	7
5	554	7
6	548	7
<b>Promedio</b>	<b>486 ± 61</b>	<b>7</b>

En las tablas 3 y 4 se presentan los cálculos de las pruebas de resistencia a la flexión y compresión, Al comparar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura y las propiedades del polipropileno virgen, se observa que la resistencia a la flexión de las maderas y cilindros plásticos (98 kg/cm<sup>2</sup>) es inferior a la esperada para el polipropileno virgen 300–450 kg/cm<sup>2</sup> (Plasticbages, s. f.). Sin embargo, estos valores se encuentran en concordancia con lo descrito por Caicedo et al. (2017), quienes reportaron reducciones del 6 % en flexión y del 8.4 % en tracción en polipropileno reprocesado mediante inyección, como consecuencia de la degradación térmica y mecánica tras varios ciclos de procesamiento.

En el caso de la compresión, se alcanzó un promedio de 163.4 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual constituye un aporte novedoso respecto a la literatura, ya que estudios como el de Caicedo et al. (2017) no reportan esta propiedad y la fuente consultada de polipropileno virgen (Plasticbages, s. f.) tampoco la específica. Estos resultados confirman que, aunque el reciclaje y el proceso de fundición pueden reducir parcialmente las propiedades mecánicas, las piezas elaboradas mantienen una resistencia adecuada para aplicaciones donde predominan cargas compresivas, lo que las hace viables para su uso en mobiliario alternativo y proyectos sustentables.

Las fórmulas empleadas fueron las siguientes:

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

Ecuación 9. Cálculo de resistencia a la flexión.

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{F}{\pi r^2}$$

Ecuación 8. Cálculo de resistencia a la compresión.

Tabla 4. Cálculo de resistencia a la flexión

Tabla	Carga aplicada (kg)	Separación entre los puntos de apoyo (cm)	Ancho de la tabla (cm)	Espesor de la tabla (cm)	Resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )
	F	L	w	h	R
1	540	5	17.1	1.5	105.26
2	520	5	17.2	1.5	100.78
3	440	5	17.1	1.5	85.77
4	570	5	17.3	1.5	109.83
5	500	5	17.2	1.5	96.90
6	470	5	17.4	1.5	90.04
<b>Promedio</b>					<b>98.10±8.31</b>

Tabla 5. Cálculo de resistencia a la compresión

Cilindro	Carga aplicada (kg)	$\pi = 3.1416$	Radio de la base R (cm)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
	F		w	R
1	3510		2.5	178.76
2	3440		2.45	182.42
3	3310		2.4	182.92
4	2360		2.5	120.19
5	3250		2.5	165.52
6	2840		2.45	150.60
<b>Promedio</b>				<b>163.40±22.41</b>

## 10.2 Desempeño del horno operado con biogás frente al uso de energía eléctrica, considerando tiempos de fundición y calidad de las tablas de madera plástica producidas. (Objetivo 2)

### 10.2.1 Cálculo de la potencia y consumo eléctrico del horno

De acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo, el horno piloto opera con una tensión de 220 V, una corriente máxima de 40 A y una frecuencia de 50–60 Hz. A partir de estos valores se determinó la potencia eléctrica máxima teórica que el horno puede demandar cuando opera a plena carga. (IEC, 2019; Boylestad & Nashelsky, 2014)

$$P = V \times I$$

*Ecuación 10. Potencia eléctrica máxima teórica.*

Sustituyendo los valores:

$$P = 220 \text{ V} \times 40 \text{ A} = 8,800 \text{ W} = 8.8 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la potencia máxima que el horno puede alcanzar es de 8.8 kW.

Para conocer la energía consumida durante una operación de 45 minutos (equivalente a 0.75 h), se aplicó la siguiente expresión:

$$E = P \times t$$

*Ecuación 11. Energía consumida del horno.*

$$E = 8.8 \text{ kW} \times 0.75 \text{ h} = 6.6 \text{ kWh}$$

De esta forma, se estima que el horno, al operar de manera continua a plena carga durante 45 minutos, consume aproximadamente 6.6 kWh de energía eléctrica.

### 10.2.2 Cálculo de la huella de carbono del horno eléctrico

Con el dato de consumo eléctrico, fue posible estimar la huella de carbono utilizando el factor de emisión promedio de la red eléctrica mexicana.

Paso 1. Factor de emisión

De acuerdo con reportes de la CFE y la SEMARNAT (CFE, 2021; SEMARNAT, 2022), el factor de emisión promedio en México varía entre 0.40 y 0.45

kg CO<sub>2</sub>e/kWh, dependiendo de la matriz energética (gas natural, combustóleo, hidroeléctrica, eólica, solar, etc.).

Para este cálculo se adopta un valor representativo de:

$$FE = 0.42 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$$

*Ecuación 12. Factor de emisión en México.*

Paso 2. Emisiones del horno

$$\text{CO}_2\text{e} = E_{\text{eléctrica}} \times FE$$

*Ecuación 13. Emisiones de CO<sub>2</sub>e generadas en el horno.*

$$\text{CO}_2\text{e} = 6.6 \text{ kWh} \times 0.42 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 2.77 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Finalmente obtenemos que la huella de carbono que genera el horno en 45 minutos a plena carga es de 2.77 kg CO<sub>2</sub>e.

### 10.2.3 Cálculo del PCI del Biogás

Para la operación del horno adaptado a biogás se utilizó el dato del volumen promedio obtenido en la Tabla 4, de 622 L (0.622 m<sup>3</sup>) de biogás con una fracción de CH<sub>4</sub> del 60% (Sosa, 2025).

El PCI del metano puro es 35.8 MJ/m<sup>3</sup>, sin embargo, al mezclarse con CO<sub>2</sub> y otros gases, el PCI del biogás disminuye.

(IPCC, 2006; DOE, 2020; FAO, 2011).

Por tanto, se calcula:

$$PCI_{\text{biogás}} = PCI_{\text{CH}_4} \times x_{\text{CH}_4}$$

$$PCI_{\text{biogás}} = 35.8 \text{ MJ/m}^3 \times 0.60 = 21.48 \text{ MJ/m}^3$$

Este valor indica que cada metro cúbico de biogás libera aproximadamente 21.48 MJ de energía útil al quemarse.

### 10.2.4 Energía liberada por el biogás

$$E = V \times PCI = 0.622 \text{ m}^3 \times 21.5 \text{ MJ/m}^3 = 13.4 \text{ MJ} = 1.34 \times 10^{-5} \text{ TJ}$$

### 10.2.5 Cálculo de la huella de carbono del biogás

De acuerdo con el IPCC (IPCC, 2006), se consideran las emisiones directas de metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ) generadas durante la combustión del biogás.

### 10.2.6 Conversión a $CO_2$ equivalente

Factores de emisión de otros gases kg/TJ

$$CH_4 = 1.34 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$N_2O = 1.34 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

Usando los potenciales de calentamiento global (IPCC, 2021):

$$CH_4 = 27, N_2O = 273$$

$$CO_2e = (CH_4 \times 27) + (N_2O \times 273)$$

$$CO_2e = 0.00036 + 0.00037 = 0.00073 \text{ kg } CO_2e$$

### 10.2.7 $CO_2$ biogénico

Además del  $CO_2e$  fósil, se genera  $CO_2$  biogénico derivado del carbono contenido en el metano, a partir de la energía térmica liberada por los 622 L de biogás utilizados en la operación del horno (13.4 MJ), se estimó la masa de metano requerido para su combustión completa. Con un poder calorífico inferior (PCI) de 50 MJ/kg, la masa de  $CH_4$  equivalente fue de:

$$m_{CH_4} = \frac{13.4 \text{ MJ}}{50 \text{ MJ/kg}} \approx 0.268 \text{ kg}$$

Aplicando la relación estequiométrica de combustión ( $44/16 = 2.75$ ), la masa de dióxido de carbono biogénico generada fue:

$$m_{CO_2} = 0.268 \text{ kg} \times 2.75 \approx 0.74 \text{ kg de } CO_2 \text{ biogénico}$$

Por lo tanto, la combustión del metano contenido en el biogás produce aproximadamente 0.74 kg de  $CO_2$  biogénico, el cual no se incluye en la huella de carbono fósil del sistema (IPCC, 2006; EPA, 2018).

## 11 Discusión

La presente investigación se propuso evaluar la viabilidad técnica y ambiental de sustituir la energía eléctrica convencional por biogás en el proceso de fundición de polipropileno reciclado, validando así la hipótesis de que esta adaptación energética permitiría una producción efectiva de maderas plásticas con una significativa reducción de la huella de carbono. Los resultados obtenidos confirman la factibilidad de la propuesta, tanto desde la perspectiva operativa como desde la contribución a la sostenibilidad.

### 11.1 Evaluación del Desempeño Energético y Viabilidad Técnica (Objetivo 2)

El objetivo específico 2 buscaba evaluar el desempeño del horno adaptado a biogás frente al uso de energía eléctrica. La comparación de la energía requerida representa un hallazgo central para la viabilidad técnica del proyecto.

#### 11.1.1 Sustitución Energética y Criterio de Validación

El consumo eléctrico teórico del horno, operando a plena carga durante 45 minutos, se estimó en 6.6 kWh, equivalentes a aproximadamente 23.8 MJ. En contraste, la energía térmica aportada por el biogás, calculada a partir de un volumen promedio consumido de 622 L, fue de 13.4 MJ. Esta comparación muestra que la energía asociada al biogás es menor que la energía eléctrica teórica considerada para el horno a máxima potencia, por lo que no puede hablarse de una sustitución energética estrictamente equivalente.

Sin embargo, es importante precisar que el valor de 6.6 kWh corresponde a una condición máxima de diseño y no a una medición directa del consumo real durante la fundición, mientras que el cálculo de 13.4 MJ se basa en el poder calorífico del biogás sin cuantificar de manera detallada las pérdidas térmicas del sistema. Por ello, la comparación debe interpretarse como una estimación de orden de magnitud. Aun con esta limitación, el hecho de que se logrará la fundición homogénea y la fabricación de las tablas, se respalda la viabilidad técnica del uso de biogás como fuente alternativa de energía.

#### 11.1.2 Cuantificación del Consumo y Estabilidad del Flujo (Objetivo 1)

Respecto al objetivo 1 (cuantificación del volumen y flujo), se determinó que la fabricación de tablas requirió un volumen promedio de 622 L de biogás, mientras que los cilindros consumieron un promedio de 486 L. Esta diferencia en el volumen consumido se atribuye al mayor volumen de material y superficie de contacto en las tablas, lo que exigió un tiempo de exposición térmica más prolongado. No obstante, el factor crucial fue la estabilidad del flujo de caudal, mantenido constantemente en 7 L/min, lo que aseguró una fusión homogénea

del polipropileno y reafirmó la eficacia del sistema de regulación implementado en la línea de alimentación.

## 11.2 Propiedades Mecánicas y Contexto del Reciclaje

El análisis de las propiedades mecánicas de las piezas finales es fundamental para confirmar la calidad de las maderas plásticas producidas con biogás.

### 11.2.1 Resistencia a la Flexión

La resistencia promedio a la flexión de las tablas fue de 98.10 kg/cm<sup>2</sup>. Este resultado es inferior a la resistencia esperada para el polipropileno virgen, que se sitúa entre 300 y 450 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, esta disminución es esperable en el contexto del reciclaje, ya que está en concordancia con lo reportado por Caicedo et al. (2017), quienes documentaron reducciones en las propiedades mecánicas del polipropileno como consecuencia de la degradación térmica y mecánica tras ciclos de reprocesamiento. Este hallazgo subraya la importancia de utilizar el material reciclado (rPP) en aplicaciones que toleren esta variación.

### 11.2.2 Resistencia a la Compresión como Aporte Novedoso

La resistencia a la compresión de los cilindros alcanzó un promedio de 163.4 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor constituye un aporte novedoso a la literatura, dado que en estudios previos sobre polipropileno reprocesado como el de Caicedo et al., (2017) o en especificaciones de material virgen Plasticbages,(s. f.), no se reportan esta propiedad. La alta resistencia a la compresión obtenida confirma la viabilidad de las piezas para aplicaciones donde las cargas compresivas son predominantes, como el mobiliario alternativo o elementos de construcción.

## 11.3 Beneficios Ambientales y Reducción de la Huella de Carbono (Objetivo 3)

La estimación de los beneficios ambientales constituye la validación del objetivo 3 y el pilar de sostenibilidad de la tesis.

### 11.3.1 Reducción de Emisiones

La huella de carbono generada por el horno eléctrico en 45 minutos fue de 2.77 kg CO<sub>2</sub>e. Al sustituir esta fuente por biogás, las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociadas a la combustión incompleta (metano y óxido nitroso) se redujeron drásticamente a 0.00073 kg CO<sub>2</sub>e. Esta diferencia demuestra que el proyecto logra un beneficio ambiental que supera con creces el criterio de interpretación, el cual establecía que la sustitución debía lograr una reducción de al menos el 90% en las emisiones de CO<sub>2</sub>e.

### 11.3.2 Aprovechamiento del Metano y Carácter Biogénico del CO<sub>2</sub>

La estrategia de utilizar el biogás es clave para la mitigación del cambio climático, ya que permite la captura y el uso energético del CH<sub>4</sub>, un gas que es 80 veces más contaminante que el CO<sub>2</sub> en su estado no combustionado. Adicionalmente, se debe considerar que el CO<sub>2</sub> generado (0.82 kg) se reporta por separado como CO<sub>2</sub> biogénico. Esto es crucial, ya que el CO<sub>2</sub> biogénico, al provenir de la biomasa (excretas de búfalo), forma parte del ciclo natural del carbono y no se contabiliza dentro de la huella de carbono fósil.

### 11.4 Aporte a la Economía Circular

Finalmente, los resultados se enmarcan en los principios de la economía circular y la sostenibilidad energética. El proyecto transforma dos tipos de residuos excretas para generar energía y polipropileno posconsumo para generar material duradero en productos finales (maderas plásticas) con un ciclo de vida útil de aproximadamente 150 años. Esta integración demuestra la viabilidad de impulsar procesos productivos más limpios y responsables, contribuyendo a la disminución del consumo eléctrico y a la reducción de la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente.

## 12 Conclusiones

Las conclusiones de la presente tesis se derivan de la evaluación de la viabilidad técnica y ambiental del uso de biogás para la fundición de polipropileno reciclado, validando los objetivos planteados y la hipótesis de investigación.

### 12.1 Viabilidad General y Sustitución Energética

- Se concluye que el uso de biogás como fuente energética en el proceso de fundición es viable desde una perspectiva técnica y ambiental.
- La adaptación del horno eléctrico, mediante la incorporación de un quemador tipo estrella, permitió la sustitución efectiva del consumo de energía eléctrica en el proceso de fundición de polipropileno reciclado, lo cual valida la hipótesis. El proceso resultó en la producción de tablas de madera plástica.

### 12.2 Desempeño Técnico y Cuantificación del Biogás (Objetivos 1 y 2)

- Se cuantificó que el volumen promedio de biogás requerido fue de 622 litros para la fabricación de tablas y 486 litros para la elaboración de cilindros. Esta diferencia se atribuye al mayor volumen de material y superficie de contacto que demandan las tablas.
- El flujo de caudal se mantuvo constante a 7 litros por minuto (L/min) en ambas pruebas, lo que fue clave para asegurar una fusión homogénea del polipropileno.
- A pesar de que la energía liberada por el biogás consumido fue de 13.4 MJ, esta resultó suficiente para la fundición, sustituyendo la demanda teórica máxima de energía eléctrica del horno, estimada en 6.6 kWh para una operación a plena carga de 45 minutos.

### 12.3 Propiedades Mecánicas y Calidad del Producto

- Los resultados de las propiedades mecánicas demuestran una resistencia significativamente mayor a la compresión en los cilindros plásticos ( $163.4 \text{ kg/cm}^2$ ) en comparación con la resistencia a la flexión de las maderas plásticas ( $98 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Este comportamiento es coherente con el comportamiento típico del polipropileno reciclado (rPP).
- El producto final cumple con los requerimientos mecánicos necesarios para su uso práctico, ya que la alta resistencia a la compresión confirma la capacidad del material para soportar cargas estructurales verticales más intensas, mientras que la resistencia a la flexión es lo suficientemente relevante para aplicaciones que requieren cierta flexibilidad, como muebles o elementos arquitectónicos.

## 12.4 Beneficios Ambientales y Reducción de la Huella de Carbono (Objetivo 3)

- La sustitución de energía generó un beneficio ambiental significativo. Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) se redujeron drásticamente: el escenario eléctrico generaba 2.77 kg CO<sub>2</sub>e en 45 minutos, mientras que el escenario con biogás solo generó 0.00073 kg CO<sub>2</sub>e por combustión incompleta.
- Se concluye que se logró una reducción potencial de emisiones de GEI superior al 90% respecto al escenario eléctrico.
- El dióxido de carbono generado por la combustión (aproximadamente 0.82 kg) se considera CO<sub>2</sub> biogénico, por lo que no se contabiliza en la huella de carbono fósil, ya que forma parte del ciclo natural del carbono.
- El proyecto promueve una gestión eficiente y sostenible de recursos energéticos renovables (biogás) y contribuye a la economía circular al valorizar plásticos reciclados en productos funcionales con propiedades mecánicas adecuadas.

## 13 Referencias bibliográficas

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2014). *Electronic devices and circuit theory* (11th ed.). Pearson Education.  
<https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292038063>
- Caicedo, J., Martínez, M. & León, C. (2017). "Evaluación de las propiedades termo-mecánicas del polipropileno reprocesado por inyección," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 18, no. 3, pp. 245-254.
- Comisión Federal de Electricidad. (2021). *Informe de sustentabilidad 2021*. CFE.  
<https://www.cfe.gob.mx/finanzas/reportes-financieros/Informe%20Anual%20Documentos/Informe%20Anual%202021.pdf>
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (2023). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Diario Oficial de la Federación.  
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Connor, N. (2023). *Polietileno: fórmula, propiedades y aplicación*. Material Properties.: <https://material-properties.org/es/polietileno/>
- Connor, N. (2023a). *Cloruro de polivinilo: fórmula, propiedades y aplicación*. Material Properties.: <https://material-properties.org/es/cloruro-de-polivinilo-2/>
- Raso, J. (2021). *Europa produce la mitad del biometano y el biogás del mundo*. *El Economista*. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/11547537/12/21/Europa-produce-la-mitad-del-biometano-y-el-biogas-del-mundo.html>
- Editorial AP. (2024). *Guía completa sobre el polipropileno (PP): qué es, tipos, usos y aplicaciones*. Ambiente Plástico. <https://ambienteplastico.com/guia-completa-sobre-el-polipropileno-que-es-tipos-usos-y-aplicaciones/>
- ENVIROLIA. (s. f.). *Depuración de gases por oxidación térmica recuperativa*.  
<https://envirolia.com/soluciones/oxidacion-termica-recuperativa/>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2014). *Biogenic CO<sub>2</sub> emissions from stationary sources*. U.S. Environmental Protection Agency.  
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/framework-for-assessing-biogenic-co2-emissions.pdf>
- Esquivel, V. (2024). *Investigadores de la UJAT diseñan y patentan innovador filtro que mejora la calidad del biogás*. <https://www.xevt.com/tabasco/investigadores->

- [de-la-ujat-disenan-y-patentan-innovador-filtro-que-mejora-la-calidad-del-biogas/333379](#)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *Manual de biogás*. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *Biogas technology: A training manual for developing countries*. <https://www.fao.org/3/i2560e/i2560e.pdf>
- International EPD System. (2023). *Environmental Product Declaration (EPD): Recycled plastic lumber* (EPD No. 22857). <https://www.environdec.com/library/epd22857>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 60038: IEC standard voltages*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/72877>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis (AR6)*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Morocho, L. (2023). *Biogás: una fuente de energía sostenible para un futuro más verde*. [https://www.researchgate.net/publication/377092156\\_Biogas\\_Una\\_Fuente\\_de\\_Energia\\_Sostenible\\_para\\_un\\_Futuro\\_Mas\\_Verde](https://www.researchgate.net/publication/377092156_Biogas_Una_Fuente_de_Energia_Sostenible_para_un_Futuro_Mas_Verde)
- NOTIAGRO. (2022). *La madera plástica y sus diferentes usos aplicados a la sostenibilidad ambiental*. <https://www.agromundo.co/blog/madera-plastica/>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2012). *FAO destaca al biogás como fuente de energía para la agricultura en América Latina*. <https://news.un.org/es/story/2012/11/1258651>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2012). *FAO promueve el uso del biogás en América Latina*. <https://news.un.org/es/story/2012/02/1234591>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2023). *Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos>

- Plasticbages. (s. f.). *Características del polipropileno*.  
<https://www.plasticbages.com/caracteristicaspolipropileno.html>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2017). *Biogás, energía natural*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/biogas-energia-natural>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Panorama general de las tecnologías de reciclaje de plásticos en México y en el mundo*. INECC.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89\\_2020\\_Documento\\_Plastico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Gobierno de México.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/555093/DiagnosticoBasicoGestionIntegralResiduosF.pdf.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGYCEI)*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- Sosa, A., et al. (2025). *Producción de biogás a partir de excremento de búfalo en condiciones ambientales del sureste mexicano*. Ponencia presentada en el 7.º Congreso Nacional de la Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental (AMICA), Guadalajara, México.
- U.S. Department of Energy (DOE). (2020). *Alternative fuels data center: Fuel properties comparison*. <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). *Emissions Gap Report 2023*. <https://wedocs.unep.org/items/1e99024f-4ecf-44c8-b19c-02174832ece4>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (s. f.). *Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático: ¿cómo podemos reducirlas?*  
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>

Ventura, A. (2023). *III Foro Biogás México 2023: México tiene potencial en producción de biometano y biogás*. <https://energia.reporteindigo.com/combustibles/III-Foro-Biogas-Mexico-2023-Mexico-tiene-potencial-en-produccion-de-biometano-y-biogas-20230518-0002.html>

Zamora, C. (2024). *El biogás: un recurso renovable para procesos industriales de combustión*. Universidad de Chile. <https://www.doccity.com/es/docs/el-biogas-es-un-combustible-renovable/11259331/>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

## Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

<b>Título de Tesis:</b>	Horno de biogás aplicado a la producción de maderas plásticas: Una alternativa ecológica a la energía eléctrica
<b>Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:</b>	Mairé Paulina Torres García
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0009-2547-2681">https://orcid.org/0009-0009-2547-2681</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>Esta investigación evalúa la viabilidad técnica y ambiental del uso de biogás como fuente de energía para la fundición de polipropileno reciclado (rPP) en la fabricación de maderas plásticas, en sustitución del consumo eléctrico convencional. El problema central abordado es la acumulación masiva de residuos plásticos y el desaprovechamiento del biogás como alternativa energética sostenible para reducir la dependencia de combustibles fósiles. La metodología consistió en la adaptación de un horno eléctrico mediante la instalación de un quemador tipo estrella alimentado con biogás generado a partir de excretas de búfalo. Se fabricaron tablas de madera plástica cuantificando un consumo promedio de 622 L de biogás con un flujo constante de 7 L/min. Los resultados muestran una resistencia promedio a la flexión de 98.10 kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia a la compresión de 163.40 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual representa un aporte novedoso en el estudio del polipropileno reprocesado. Ambientalmente, la sustitución energética logró una reducción de la huella de carbono superior al 90%, pasando de 2.77 kg CO<sub>2</sub>e en el escenario eléctrico a 0.00073</p>

	<p>kg CO<sub>2</sub>e con biogás. Se concluye que el sistema es técnica y ambientalmente factible, promoviendo la economía circular al transformar residuos orgánicos y plásticos en productos funcionales de larga vida útil.</p>
<p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p>	<p>Biogás, polipropileno reciclado, madera plástica, huella de carbono, economía circular.</p>
<p><b>Referencias citadas:</b></p>	<p>Boylestad, R. L., &amp; Nashelsky, L. (2014). <i>Electronic devices and circuit theory</i> (11th ed.). Pearson Education. <a href="https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292038063">https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292038063</a></p> <p>Caicedo, J., Martínez, M. &amp; León, C. (2017). "Evaluación de las propiedades termomecánicas del polipropileno reprocesado por inyección," Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 18, no. 3, pp. 245-254.</p> <p>Comisión Federal de Electricidad. (2021). <i>Informe de sustentabilidad 2021</i>. CFE. <a href="https://www.cfe.gob.mx/finanzas/reportes-financieros/Informe%20Anual%20Documentos/Informe%20Anual%202021.pdf">https://www.cfe.gob.mx/finanzas/reportes-financieros/Informe%20Anual%20Documentos/Informe%20Anual%202021.pdf</a></p> <p>Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (2023). <i>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos</i>. Diario Oficial de la Federación. <a href="https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf">https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf</a></p> <p>Connor, N. (2023). <i>Polietileno: fórmula, propiedades y aplicación</i>. Material Properties.: <a href="https://material-properties.org/es/polietileno/">https://material-properties.org/es/polietileno/</a></p> <p>Connor, N. (2023a). <i>Cloruro de polivinilo: fórmula, propiedades y aplicación</i>.</p>

Material Properties.: <https://material-properties.org/es/cloruro-de-polivinilo-2/>

Raso, J. (2021). *Europa produce la mitad del biometano y el biogás del mundo*. *El Economista*.  
<https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/11547537/12/21/Europa-produce-la-mitad-del-biometano-y-el-biogas-del-mundo.html>

Editorial AP. (2024). *Guía completa sobre el polipropileno (PP): qué es, tipos, usos y aplicaciones*. *Ambiente Plástico*.  
<https://ambienteplastico.com/guia-completa-sobre-el-polipropileno-que-es-tipos-usos-y-aplicaciones/>

ENVIROLIA. (s. f.). *Depuración de gases por oxidación térmica recuperativa*.  
<https://envirolia.com/soluciones/oxidacion-termica-recuperativa/>

Environmental Protection Agency (EPA). (2014). *Biogenic CO<sub>2</sub> emissions from stationary sources*. U.S. Environmental Protection Agency.  
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/framework-for-assessing-biogenic-co2-emissions.pdf>

Esquivel, V. (2024). *Investigadores de la UJAT diseñan y patentan innovador filtro que mejora la calidad del biogás*.  
<https://www.xevt.com/tabasco/investigadores-de-la-ujat-disenan-y-patentan-innovador-filtro-que-mejora-la-calidad-del-biogas/333379>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *Manual de biogás*.  
<https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *Biogas technology: A training manual for developing countries*. <https://www.fao.org/3/i2560e/i2560e.pdf>

International EPD System. (2023). *Environmental Product Declaration (EPD): Recycled plastic lumber (EPD No. 22857)*. <https://www.environdec.com/library/epd22857>

International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 60038: IEC standard voltages*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/72877>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 - Energy*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis (AR6)*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Morocho, L. (2023). *Biogás: una fuente de energía sostenible para un futuro más verde*. [https://www.researchgate.net/publication/377092156\\_Biogas\\_Una\\_Fuente\\_de\\_Energia\\_Sostenible\\_para\\_un\\_Futuro\\_Mas\\_Verde](https://www.researchgate.net/publication/377092156_Biogas_Una_Fuente_de_Energia_Sostenible_para_un_Futuro_Mas_Verde)

NOTIAGRO. (2022). *La madera plástica y sus diferentes usos aplicados a la*

sostenibilidad ambiental.  
<https://www.agromundo.co/blog/made-ra-plastica/>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2012). *FAO destaca al biogás como fuente de energía para la agricultura en América Latina*.  
<https://news.un.org/es/story/2012/11/1258651>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2012). *FAO promueve el uso del biogás en América Latina*.  
<https://news.un.org/es/story/2012/02/1234591>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2023). *Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos*.  
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos>

Plasticbages. (s. f.). *Características del polipropileno*.  
<https://www.plasticbages.com/caracteristicaspolipropileno.html>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2017). *Biogás, energía natural*.  
<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/biogas-energia-natural>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Panorama general de las tecnologías de reciclaje de plásticos en México y en el mundo*. INECC.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89\\_2020\\_Documento\\_Plastico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Gobierno de México.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/atta>

<chment/file/555093/DiagnosticoBasicoGestionIntegralResiduosF.pdf.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero* (INEGYCEI). <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Sosa, A., et al. (2025). *Producción de biogás a partir de excremento de búfalo en condiciones ambientales del sureste mexicano*. Ponencia presentada en el 7.º Congreso Nacional de la Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental (AMICA), Guadalajara, México.

U.S. Department of Energy (DOE). (2020). *Alternative fuels data center: Fuel properties comparison*. <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>

United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). *Emissions Gap Report 2023*. <https://wedocs.unep.org/items/1e99024f-4ecf-44c8-b19c-02174832ece4>

United Nations Environment Programme (UNEP). (s. f.). *Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático: ¿cómo podemos reducirlas?* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>

Ventura, A. (2023). *III Foro Biogás México 2023:*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

México tiene potencial en producción de biometano y biogás.  
<https://energia.reporteindigo.com/com-bustibles/III-Foro-Biogas-Mexico-2023-Mexico-tiene-potencial-en-produccion-de-biometano-y-biogas-20230518-0002.html>

Zamora, C. (2024). *El biogás: un recurso renovable para procesos industriales de combustión*. Universidad de Chile.  
<https://www.doccity.com/es/docs/el-biogas-es-un-combustible-renovable/11259331/>