



UNIVERSIDAD INTERCULTURAL INDÍGENA DE MICHOACÁN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Tesis:

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOENERGÉTICO DE RESIDUOS DE BIOMASA CASO DE ESTUDIO: COLEGIO DE BACHILLERES PLANTEL SAN FRANCISCO PICHÁTARO

Presenta:

RAMIRO GUDIÑO MACEDO

Para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética

Director de tesis:

DR. MARIO MORALES MÁXIMO

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Codirector de tesis:

DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ GARCÍA

Universidad Nacional Autónoma de México

Campus Morelia

Pátzcuaro, Michoacán, mayo del 2026



UNIVERSIDAD INTERCULTURAL INDÍGENA DE MICHOACÁN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Tesis:

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOENERGÉTICO DE RESIDUOS DE BIOMASA CASO DE ESTUDIO: COLEGIO DE BACHILLERES PLANTEL SAN FRANCISCO PICHÁTARO

Presenta:

RAMIRO GUDIÑO MACEDO

Para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética

Director de tesis:

DR. MARIO MORALES MÁXIMO

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Codirector de tesis:

DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ GARCÍA

Universidad Nacional Autónoma de México
Campus Morelia

Comité lector:

DR. JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

DR. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

DR. JUAN CARLOS CORRAL HUACUZ

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Pátzcuaro, Michoacán, mayo del 2026.

DEDICATORIAS

A mis padres

María Imelda del Socorro Macedo Roldán y Ramiro Gudiño Alcaraz, aunque ya no están conmigo quiero dedicarles este proyecto, y gracias a sus enseñanzas seguimos preparándonos y trabajando para ser una persona de bien y aportar desarrollo a la sociedad para un futuro más sustentable.

A mi familia

Quiero agradecer a mis hijos Amaia Esmeralda Gudiño Rodríguez y Ramiro Gudiño Rodríguez a mi esposa Hortencia Rodríguez Montiel, que me apoyaron en este proyecto de estudio, sacrificando tiempo conmigo, pero esa falta de tiempo juntos se ve reflejada en el trabajo de este proyecto.

A la UIIM.

También agradezco a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán por la oportunidad de estudiar el posgrado, Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética, y actualizarme en temas de interés energético, para trabajar en un futuro sostenible.

UMSNH

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

Agradezco al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, por las facilidades para la utilización del laboratorio de la Facultad para la preparación de muestras, para los distintos análisis para la realización de este proyecto.

Agradezco a los compañeros de la maestría por el compañerismo, el profesionalismo y el apoyo recibido, durante el proceso de la maestría.

AGRADECIMIENTOS

A LAS INSTITUCIONES

El presente trabajo se hizo con apoyo del CONAHCYT, que en la actualidad es el SECIHTI, bajo el esquema de energías renovables y la sostenibilidad, en la institución del Colegio de Bachilleres del Estado de Michoacán en el plantel de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, Así a gradecer al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, por su participación y apoyo en el presente proyecto, al Mtro, Luis Fernando Pintor Ibarra por su apoyo y facilidades para utilizar el laboratorio de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera necesarias para la realización de este proyecto y Agradecer a Dr. Víctor Manuel Ruiz García, por la participación como codirector en el presente proyecto de investigación, ENES-UNAM

Agradecimientos espéciales al laboratorio de innovación y evaluación de la bioenergía (LINEB) y al laboratorio nacional de biocombustibles sólidos (BIOENER) “ApoyoLNC-2023-40”, el cual fue apoyo fundamental para que la presente investigación se llevase acabo. A la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, por la oportunidad de estudiar un posgrado como la MISE, (Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética), y seguir con mi desarrollo profesional.

A MI DIRECTOR Y CODIRECTOR DE TESIS

A los asesores, el director Dr. Mario Morales Máximo (UIIM) y el codirector Dr. Víctor Manuel Ruiz Gracia (UNAM), también mis agradecimientos por todos los apoyos, aprendizajes y paciencia, que me tuvieron en la elaboración del presente proyecto.

A MI COMITÉ LECTOR

Está conformado por: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones (UMSNH), Dr. Luis Bernardo López Sosa (UIIM), Dr. Juan Carlos Corral Huacuz (UIIM), por todas las aportaciones al presente proyecto para su complementación.

ÍNDICE

Contenido de Figuras	I
Contendio de Tablas	II
Contenido de Anexos	III
Resumen	IV
Abstract	IV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3. Planteamiento del Problema	7
1.4. Justificación.....	7
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo General.....	8
1.5.2. Objetivos Específicos	9
1.6. Hipótesis	9
CAPÍTULO 2	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1. La sustentabilidad.....	10
2.2. La sustentabilidad energética	11
2.3. La agenda 2030	12
2.3.1. Objetivo número 7	14
2.4. La energía renovable	15
2.5. La ecotecnología.....	15
2.5.1. La energía solar	17
2.5.2. La energía de la biomasa	18
2.6. La bioenergía.....	20
2.7. Los biocombustibles	21
2.7.1. Los biocombustibles líquidos	22
2.7.2. Los bicombustibles gaseosos	22
2.7.3. Los biocombustibles sólidos	22

2.8. Briquetas.....	23
2.9. Gases de efecto invernadero	24
2.10. Gas metano	25
CAPÍTULO 3	26
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1. Proceso metodológico de la investigación	26
.....	27
3.2. Etapa 1 identificación de residuos biomásicos	28
3.2.1 Recolección de residuos	29
3.2.2 Procesamiento de las muestras	30
3.3. Etapa 2 Caracterización Físico-Químico y Energética	31
3.4. Determinación del contenido de humedad (%CH)	31
3.5. Determinación del poder calorífico superior	32
3.6. Determinación del contenido de cenizas	33
3.7. Determinación del material volátil.....	34
3.8. Determinación del carbono fijo	35
3.9. Análisis químico básico	35
3.10. Microanálisis de cenizas	36
3.11. Análisis elemental	37
3.12. Charla de sensibilización sobre aprovechamiento de residuos de biomasa con alumnado del COBAEM.....	38
CAPÍTULO 4	40
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	40
4.1. Identificación de residuos de biomasa	40
4.1.1. Recolección de residuos	41
4.1.2. Acondicionamiento de muestras	42
4.2 Caracterización Físico-Químico y Energética.	43
4.2.1. Determinación del contenido de humedad (%CH).....	43
4.2.2. Poder calorífico superior	44
4.2.3. Determinación de contenido de contenido de cenizas.....	46
4.2.4. Determinación de material volátil	47
4.2.5. Determinación del carbono fijo	49
4.2.6. Análisis químico básico.....	50

4.2.7. Microanálisis de cenizas	51
4.2.8. Análisis elemental.....	53
4.3. Charla sobre sensibilización sobre aprovechamiento de residuos de biomasa con alumnado del COBAEM.....	54
CAPÍTULO 5	55
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	55
5.1. Identificación de residuos de biomasa	55
5.2. Contenido de humedad	55
5.3. Discusión poder calorífico	56
5.4. Contenido de cenizas	56
5.5. Contenido de material volátil	57
5.6. Discusión carbono fijo	58
5.7. Discusión análisis químico básico.....	59
5.8. Discusión del microanálisis de cenizas.....	60
5.9. Discusión del análisis elemental.....	62
5.10. Discusión de la sensibilización en estudiantes del COBAEM.....	63
Conclusiones.....	64
Recomendaciones.....	65
Referencias bibliográficas	66
ANEXOS.....	72
Anexo A Presentación de la charla de sensibilización sobre el aprovechamiento de los residuos biomásicos.	72
Anexo B Actividad de la charla de sensibilización de los residuos biomásicos. Al alumnado del COBAEM.....	74
Anexo C Artículo Indexado	75

Contenido de Figuras

Figura 2.1. Características de la energía renovable	12
Figura 2.2. Objetivos agenda 2030	14
Figura 2.3. Ecotecnologías	16
Figura 2.4. Ciclo de la biomasa	19
Figura 2.5. Energía de la Madera	21
Figura 2.6. Briquetas	24
Figura 3.1. Diagrama metodológico	27
Figura 3.2. Área de estudio plano del COBAEM San Francisco Pichátaro.	28
Figura 3.3. Recolección de residuos biomásicos en COBAEM Pichataro	29
Figura 3.4. Balanza para cálculo de porcentaje de humedad (imagen propia)	31
Figura 3.5. Bomba Calorimétrica	32
Figura 3.6. Equipo para determinación de contenido de cenizas	33
Figura 3.7. Analizador CHNS/O: Elementar Vario EL Cube	38
Figura 4.1. Recolección	41
Figura 4.2. Equipo de preparación de muestra	42

Contendio de Tablas

Tabla 4.1. Distribución de las áreas del COBAEM San Francisco Pichátaro	39
Tabla 4.2. Recursos biomásicos	39
Tabla 4.3. Estimación de residuos de biomasa	40
Tabla 4.4. Determinación del contenido de humedad (%CH).....	43
Tabla 4.5. Poder Calorífico Superior.....	44
Tabla 4.6. Determinación de contenido de ceniza.....	45
Tabla 4.7. Determinación de Contenido de Material Volátil.	47
Tabla 4.8. Determinación de Carbono Fijo	48
Tabla 4.9. Análisis químico básico.....	49
Tabla 4.10. Microanálisis de ceniza	51
Tabla 4.11. Análisis elemental	52

Contenido de Anexos

Anexo A.-	
Presentación de la charla de sensibilización sobre el aprovechamiento de los residuos biomásicos.....	69
Anexo B.-	
Actividad de la charla de sensibilización de los residuos biomásicos. Al alumnado del COBAEM.....	71

Resumen

La presente investigación se realizó en el Colegio de Bachilleres del plantel San Francisco Pichátaro, para aprovechar los residuos de biomasa que se desprenden de las áreas verdes, y árboles que hay se encuentran estos residuos se densificarán para producir residuos de biocombustibles sólidos, en específico briquetas. También se evaluaron las propiedades físicas, químicas y energéticas, a través de un proceso de caracterización experimental de estos residuos, se determinarán factores de viabilidad y calidad, para la producción de un biocombustible de tipo sólido, el análisis de laboratorio realizado fue sobre las cinco muestras seleccionadas, se concluye que los residuos analizados son viables para la generación de biocombustibles sólidos ya que cumplen con los parámetros esenciales para la generación de biocombustibles. Este trabajo se basa en un enfoque cultural para la comunidad de San Francisco Pichátaro, en el área de estudio del Colegio de Bachilleres de Michoacán, integrando criterios científicos con el contexto local de uso y gestión de recursos forestales. Además, este trabajo ayudará a aprovechar residuos generados en el plantel, que en sin un proceso de compactación sería muy poca su utilidad y en forma compacta se pueden aprovechar, el estudio propone una ruta práctica para implementar alternativas energéticas sostenibles en la comunidad, Los resultados sientan las bases para el desarrollo de proyectos comunitarios de bioenergía destinados a fortalecer la seguridad energética y la resiliencia económica en regiones forestales del estado de Michoacán y en el país de México.

Abstract

This research was conducted at the San Francisco Pichátaro high school to utilize biomass waste from green areas and trees. This waste will be densified to produce solid biofuel waste, specifically briquettes. The physical, chemical, and energetic properties of this waste were also evaluated through an experimental characterization process. Viability and quality factors for the production of a solid biofuel were determined. Laboratory analysis was performed on five selected samples, and it was concluded that the analyzed waste is viable for the generation of solid biofuels, as it meets the essential parameters for biofuel production. This work is based on a cultural approach for the community of San Francisco Pichátaro, within the study area of the Michoacán College of Baccalaureate Studies, integrating scientific criteria with the local context of forest resource use and management. Furthermore, this work will help to utilize waste generated at the school, which, without a compaction process, would have very little use, but in compact form can be utilized. The study proposes a practical path for implementing sustainable energy alternatives in the community. The results lay the groundwork for the development of community bioenergy projects aimed at strengthening energy security and economic resilience in forest regions of the state of Michoacán and throughout Mexico.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Las innovaciones de base para la sostenibilidad están atrayendo cada vez más atención en el ámbito académico, activista y político. Aunque se reconoce su potencial transformador, muy poca investigación se ha realizado específicamente. Se llevó a cabo sobre cómo surgen perspectivas, estrategias y acciones transformadoras. Se explora el papel de aprendizaje en la promoción de estrategias transformadoras hacia la sostenibilidad. Se desarrolla un marco heurístico conectando ideas de la literatura sobre aprendizaje social y la gestión estratégica de nichos y abordando el caso de energía (Pellicer-Sifres et al., 2018). Resultados encontraron que los factores micropolíticos son impulsores que influyen en el surgimiento del aprendizaje de primer y segundo orden. A su vez, este aprendizaje moldea tres estrategias diferentes propuestas por esta iniciativa de base, a saber: estrategias comerciales, sociales y de empoderamiento. Los resultados también brindan ideas para ilustrar que, para desarrollar transformaciones radicales cambios hacia la sostenibilidad no basta simplemente con ampliar el régimen (estrategia comercial) o hacer Propuestas sostenibles y sociales (estrategia social), a menos que se alcancen a través de un proceso de empoderamiento, que transforme los valores y relaciones actuales (estrategia de empoderamiento) (Pellicer-Sifres et al., 2018).

El concepto de desarrollo sustentable o sostenible es un concepto que, trascendió y se fortaleció a través del tiempo. El uso del término “sostenible” ha generado un agotamiento de su concepto inicial, perdiendo su significado y dificultando su análisis. La discusión del papel de lo sustentable en el acontecer del desarrollo de la sociedad, considerando que este concepto contempla cambios relevantes en la contemporaneidad respecto a lo que vale de la sociedad. A partir de una reseña histórica del significado de lo sostenible y/o sustentable hasta nuestros días, en especial a partir del futuro común (ONU, 1987), se presentan ambos conceptos que, si bien tienen aristas comunes, lo sustentable hace relación a la armonía existente entre lo económico, lo social, lo ambiental con el sistema de valores, en tanto que lo sostenible contempla cada uno de dichos subsistemas por separado (Ávila, 2018).

A medida que la población pasa de lo rural a lo urbano, el tema de sostenibilidad urbana se actualiza día tras día, pues esto se ha convertido en un importante asunto a tratar a nivel político, social, económico y medioambiental. Muchas ciudades alrededor del mundo enfrentan desafíos relacionados al desgaste ambiental y la habitabilidad. Cada una busca tener las estrategias necesarias para alcanzar la Sostenibilidad Urbana. (Mogrovejo-Narváez & Quesada-Molina, 2022).

Esta Sostenibilidad va en conjunto con las costumbres de la sociedad y usa recursos energéticos ambientales. Con esto inicia la necesidad de tener un marco de indicadores establecidos en estrategias energéticas dirigidas hacia la sostenibilidad urbana de las distintas

ciudades. Se busca sintetizar los textos, teorías y trabajos realizados existentes con relación al tema de sostenibilidad urbana las cuales sean aplicables en el medio, evaluando el desarrollo urbano y estableciendo una relación de indicadores que busquen un equilibrio medioambiental y centralicen a la población hacia la sostenibilidad urbana (Mogrovejo-Narváez & Quesada-Molina, 2022).

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (en particular en el Objetivo número 11 sobre Ciudades y Comunidades Sostenibles) se aprobó la Directiva 2018/844 UE de 30 de mayo, modificando las anteriores 2010/31 de eficiencia energética de edificios y 2012/27 de eficiencia energética, para lograr "un parque inmobiliario descarbonizado y altamente eficiente para transformar los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo, con una renovación a una tasa media anual del 3% aplicando las Directrices de la OMS sobre la calidad de aire interior y apoyando medidas de fomento de financiación inteligente para edificios inteligentes de la Comisión Europea"(Mogrovejo-Narváez & Quesada-Molina, 2022).

La mejora de eficiencia energética, garantiza el establecimiento y la aplicación uniformes de todos los parámetros de cálculo necesarios, como a los requisitos mínimos de energética, y propone sistemas de control posterior automático. En el marco del proyecto del Plan nacional de innovación, se han analizado la certificación, las eco-etiquetas y el apoyo necesario con recursos financieros públicos para impulsar el futuro del sector. Para obtener esta información, se ha optado por diseñar y aplicar una técnica de investigación enfocado en lo cuantitativo. Se ha realizado encuestas a los grupos de interés del sector de la edificación y rehabilitación, considerando su experiencia con el manejo de la eficiencia energética y su impacto real en la sostenibilidad (Lambea Rueda et al., 2020).

La Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 y el Acuerdo de París han establecido el camino a la descarbonización. El recorrido se enfrenta a múltiples desafíos, entre ellos, conciliar los esfuerzos para lidiar simultáneamente con la lucha contra el cambio climático, el desarrollo energético y la transición justa, en un escenario caracterizado por la urgencia climática y por profundas desigualdades económicas (Rivera Albarracín, 2019).

1.2 Antecedentes

La biomasa es el resultado de la transformación de la energía solar en energía química. El hombre a través de la historia la ha utilizado no sólo para su alimentación sino también para la alimentación de sus animales. Los avances de la ciencia promovieron el desarrollo agrario basado en la revolución verde, la cual solo promueve la producción de alimentos ya sea de uso humano o animal, marginando la importancia de la biomasa como enriquecedor del recurso suelo al disponerse de los insumos necesarios para sustituir su fertilidad natural (Martínez el al., 2014). En la actualidad la producción y conservación de la biomasa de cualquier cultivo cobra una importancia trascendente; porque ello contribuye, además, a la protección medioambiental a través de la captura de carbono. Se ha demostrado la

importancia que proporciona la biomasa generalmente no alimenticia para los humanos, a fin de emplearla no solamente como alimento animal, sino también como enriquecedora del recurso natural suelo. Aun cuando en la actualidad resulta de gran importancia encontrar variantes que permitan profundizar en la producción de biomasa en su relación con el medio ambiente. Finalmente se exponen los resultados preliminares sobre producción de biomasa a partir de la agrobiodiversidad presente en los escenarios productivos, a la vez que se reflexiona sobre la importancia del tema para futuras investigaciones (Martínez et al. 2014).

La biomasa es una fuente de energía que presenta gran heterogeneidad estructural anatómica y química, con baja densidad energética, alto contenido de humedad e higroscopicidad, es hidrófila y con bajo poder calorífico. (Beltrán Hernández De Galindo & Ramírez-Montoya, 2019).

Para su aprovechamiento, la aplicación de tratamientos térmicos, conocidos como torrefacción promueven mayor eficiencia en la conversión a biocombustibles. Se han analizado la composición de la biomasa vegetal, su degradación térmica, rendimiento másico-energético y las propiedades químicas del producto final. Durante el proceso de torrefacción, se requiere de una atmósfera inerte e intervalos de temperatura de 200 a 300 °C. Este puede mejorar las características energéticas de la biomasa. Los productos sólidos, líquidos y gases obtenidos se emplean para generar energía calorífica. Los sólidos tienen menor contenido de oxígeno y humedad; lo que aumenta el poder calorífico, produce poco humo, no se fermenta, es hidrofóbico y resiste la pudrición. Los líquidos están conformados por agua, ácido acético, ácido fórmico, metanol, ácido láctico, fenol, aldehídos y cetonas. Los gases generados son principalmente CO, CO₂, H₂ y CH₄. Finalmente, para caracterizar las propiedades y la calidad de los biocombustibles, se emplean técnicas de análisis proximales y elementales. El proceso de torrefacción mejora las propiedades químicas de la biomasa vegetal, al aumentar su calidad como combustible (Beltrán Hernández De Galindo & Ramírez-Montoya, 2019).

El uso de la biomasa como recurso energético está adquiriendo especial relevancia en las estructuras económicas y de investigación, y a raíz de esto muchos proyectos se están desarrollando para este fin. La mayoría de ellos se centran en los procesos transformación de los materiales en biocombustibles y en los procesos de generación energética a partir de los mismos. No obstante, en un sistema tiene especial importancia los métodos de obtención de las materias primas y su logística, sin los cuales cualquier planificación energética quedaría incompleta. Se han hecho análisis de aprovechamiento, desde los métodos de valoración y cuantificación de la biomasa disponible, diseño de las técnicas de extracción, cosecha y logística, hasta el diseño de los sistemas de transformación de recursos biomásicos en biocombustibles y su aprovechamiento energético. En ella se describen los sistemas de extracción, se plantea la metodología empleada para su valoración, y los principios de diseño de instalaciones (Velázquez, 2018).

La biomasa como combustible, además de proveer energía de manera renovable, decrece la dependencia del crudo importado y genera valor agregado para los países donde se desarrollan. El conocimiento del comportamiento del combustible es imprescindible para diseñar y operar equipos de manera segura y eficiente, en particular el conocimiento de los minerales que contenga ya que su ceniza jugará un papel importante en la dinámica del sistema de generación. A través del conocimiento de la composición química y propiedades físicas de la ceniza es posible predecir la tendencia a formar depósitos en componentes de caldera y su potencial para causar corrosión, erosión y abrasión. El comportamiento de las cenizas en el sistema es altamente dependiente del combustible, en particular cuando se trata de desechos industriales o cultivos energéticos. Estos combustibles tienen mayor contenido de minerales, en particular Sodio, Potasio, Fósforo y Cloro, alto contenido de cenizas con bajo punto de fusión y alto potencial corrosivo. Se concentra en las características de la ceniza derivada de la combustión de biomasa, con particular atención en la química de transformaciones a alta temperatura y su efecto sobre las instalaciones. Se hace énfasis en los posibles problemas que ocurren cuando se adecúan las tecnologías de quemado de madera a cultivos energéticos, por ejemplo, de manera de evitar fallas catastróficas. Revisar las recomendaciones sobre el manejo, control y prevención de problemas asociados a cenizas (Melissari, 2012).

Las experiencias que el proyecto internacional biomas-cuba en la implementación de alternativas de suministro de energía a partir de la biomasa en el medio rural, que sean compatibles con la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Estas experiencias se enmarcan entre 2009 y 2011, en el marco del concepto de la finca agroenergética, y están relacionadas con procesos de investigación e innovación tecnológica asociados a: la evaluación morfológica, productiva y química de germoplasma de plantas oleaginosas no comestibles con potencial para producir biodiesel, etanol y otros productos; la siembra y manejo agrícola de asociaciones de *jatropha curcas* y 21 cultivos alimenticios; el beneficio y extracción de aceite de semillas de *jatropha*; la caracterización físico-química de dicho aceite; la producción de biodiesel y sus coproductos; la producción de biogás a partir de excretas y de bioproductos y bioabonos, con los efluentes de biodigestores; la gasificación de biomasa leñosa para generar electricidad; la caracterización y clasificación de sistemas integrados para la producción de alimentos y energía. Asimismo, los estudios socioeconómicos y ambientales permitieron apreciar una adecuada factibilidad económico-financiera, incrementos notables en la producción de alimentos, la formación del capital humano y la mejora de la calidad de vida de las personas, un positivo impacto ambiental, y una sustitución de portadores energéticos y fertilizantes convencionales (Suarez et al. 2011).

La cantidad de la biomasa vegetal es importante para conocer el carbono almacenado por los ecosistemas forestales y la capacidad de mitigación del cambio climático. Existen muchos métodos para estimar la biomasa, muchos de ellos con pequeñas variaciones, por ejemplo, el

tamaño y forma de las unidades de muestreo, la inclusión o no de algún componente del reservorio (hojas, ramas, raíces), diámetro mínimo inventariado, entre otras. Se explican los aspectos más importantes a considerar en el inventario de remociones, a partir del diseño de inventario (diseño estadístico, tamaño y forma de las unidades de muestreo, componentes de la biomasa a evaluar). En un segundo punto se trata el tema de la determinación de la biomasa aérea y de raíces, haciendo referencia al método directo o destructivo y a los métodos indirectos, en especial al uso de modelos matemáticos por su fácil aplicación y bajo costo; además se anotan algunos modelos para bosque natural y plantaciones. También se hace referencia al estudio de carbono en suelos, a los factores de expansión de biomasa y a cómo determinar el carbono en la biomasa. Se espera que estas notas faciliten la comprensión del tema y que sean de referencia para el establecimiento de esquemas de monitoreo, reporte y verificación (Fonseca, 2017).

El uso de residuos forestales como una fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos representa una alternativa potencial, ya que genera un biocombustible menos contaminante en comparación con los de origen fósil. Además, mientras que el calor y la electricidad pueden ser generados por otras alternativas renovables como viento, sol y agua, la producción de combustibles y la síntesis de productos químicos requieren transformar la biomasa. La elección de la estrategia de conversión depende del tipo, propiedades y cantidad de la biomasa disponible, de los requerimientos de uso, así como de los estándares ambientales y condiciones económicas. El objetivo es describir los diferentes procesos a través de los cuales se puede obtener energía a partir de residuos de biomasa forestal de residuos, así como el potencial que tienen estos residuos en la producción de los diferentes tipos de bioenergéticos. Asimismo, se describen los desafíos y problemas que aún siguen sin resolver, como lo son la recolección de residuos, escalamiento y costos de producción (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018).

Se releva el panorama de la bioenergía, y sus aplicaciones térmicas y eléctricas. Se analizan los avances en experiencias de acondicionamiento de biomasa sólida en forma de pellets, chips y carbón. Se mencionan algunos aprovechamientos energéticos más destacables, que dan cuenta de la diversidad de recursos, pero aún señalan aspectos técnicos, tecnológicos y logísticos que deben ser resueltos. En particular, grandes emprendimientos cuentan con importación de tecnología y es escasa la producción nacional (Manrique , Javi, et al., 2019).

El cambio climático y el agotamiento de determinados recursos estratégicos han colocado a la bioeconomía en la agenda de las políticas públicas en muchos países desarrollados. La energía es un insumo fundamental del tejido productivo y la bioenergía está destinada a ser un elemento central en esta nueva bioeconomía. El paulatino remplazo de los combustibles fósiles por biocombustibles, se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético actual y la bioenergía está llamada a satisfacer una proporción cada vez mayor de nuestras necesidades energéticas, tanto en la automoción

como de demanda térmica y eléctrica. Al ser una importante fuente de creación de puestos de trabajo, especialmente en áreas rurales a nivel local y regional, la bioenergía puede contribuir a la cohesión social, realizando una valiosa aportación a la sociedad más allá de su genuina contribución energética. Se describe la biomasa como recurso energético, analizando las materias primas y las tecnologías para su transformación en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Asimismo, se describen las distintas aplicaciones a las que se destinan los biocombustibles (calor, electricidad y combustibles de transporte) y su grado de penetración en el mercado. Por último, se analizan los aspectos medioambientales, sociales y económicos de la producción y uso energético de la biomasa, con especial mención a las controversias generadas sobre la potencial competencia de la producción de biomasa a gran escala con el suministro de alimentos y el acceso al agua y la tierra (Perdices, 2017).

La expansión de los cultivos energéticos puede aumentar la demanda de tierra y generar desplazamientos de cultivos alimentarios, afectando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente a través de cambios del uso del suelo (LUC por sus siglas en inglés). El aumento de la productividad agrícola podría compensar esto. El estudio investigado tiene como objetivo evaluar las emisiones combinadas de GEI causadas por podas, y utilizar las tierras excedentarias generadas para la producción de biomasa con el fin de reemplazar los combustibles fósiles en la región de la Orinoquia en Colombia para el año 2030. Los resultados muestran que las tierras excedentarias para la producción de biomasa se obtienen únicamente cuando se aplican medidas drásticas para aumentar la productividad agrícola (Ramírez-Contreras et al., 2021).

En el escenario medio y alto, podrían generarse 0,6 y 2,4 Mha de tierras excedentarias, respectivamente. Esta intensificación da como resultado una reducción en las emisiones de GEI de hasta el 83 % en el sector agrícola en la Orinoquia, que en gran medida se debe al aumento de la productividad de la producción ganadera y a la mejora de las pasturas degradadas. El potencial de bio-combustible de las tierras excedentarias se proyecta en 36 a 368 PJ por año, con un bajo riesgo de causar LUC indirecto. Esto resulta en la reducción de las emisiones de GEI de más del 100 % en comparación con su equivalente de combustibles fósiles. Una perspectiva integrada del uso del suelo agrícola permite la producción sostenible de alimentos y bioenergía. pastures (Ramírez-Contreras et al., 2021).

Para minimizar estos efectos, los criterios de sostenibilidad de la Directiva sobre Fuentes de Energía Renovables exigen biocombustibles de bajo riesgo de ILUC y ahorros mínimos de emisiones de GEI en comparación con el equivalente en combustibles fósiles. Se considera que los biocombustibles tienen un riesgo bajo de ILUC cuando los cultivos energéticos se siembran en tierras excedentarias que pueden ponerse a disposición gracias a la implementación de técnicas con base en la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la producción de bioenergía ha aumentado en las últimas décadas y se prevé que seguirá creciendo. Sin embargo, la

expansión de la producción de cultivos energéticos podría aumentar la demanda de tierras y, por consiguiente, las emisiones de GEI debido al cambio directo e indirecto (Ramírez-Contreras et al., 2021).

El presente proyecto, aprovechara residuos biomásicos generados en una institución de nivel medio superior, en materiales condensados para su aprovechamiento en labores de cocción de alimentos y calentamiento de agua, reduciendo la utilización de gas LP, reduciendo costos y limpiando áreas de residuos biomásicos.

1.3. Planteamiento del Problema

En el Colegio de Bachilleres Plantel San Francisco Pichátaro, se enfrenta el desafío de gestionar eficientemente los residuos de biomasa generados en sus actividades diarias. Estos residuos, como la madera y los desechos agrícolas, poseen un potencial energético significativo que podría aprovecharse para la generación de bioenergía a través de biocombustibles sólidos, como briquetas y pellets. Sin embargo, actualmente no se cuenta con un sistema de evaluación energética que permita determinar el potencial exacto de estos residuos para su transformación en energía. El problema radica en la falta de información precisa sobre la cantidad, calidad y disponibilidad de la biomasa residual en el plantel, así como en la ausencia de un análisis técnico que evalúe la viabilidad económica y ambiental de su aprovechamiento energético. Esta situación limita las oportunidades de utilizar estos recursos de manera sostenible y rentable, afectando tanto al plantel en términos de costos energéticos como al medio ambiente al no aprovechar una fuente de energía renovable. Por lo tanto, es fundamental desarrollar un estudio detallado de evaluación energética de los residuos de biomasa en el Colegio de Bachilleres Plantel San Francisco Pichátaro, con el fin de determinar su potencial para la generación de bioenergía mediante biocombustibles sólidos. Este estudio incluiría la caracterización de la biomasa disponible, análisis de su contenido energético, evaluación de tecnologías de conversión adecuadas y un análisis de costo-beneficio para implementar un sistema de aprovechamiento energético que sea eficiente, rentable y respetuoso con el medio ambiente.

1.4. Justificación

Al aprovechar los recursos de biomasa local; como es el caso del plantel COBAEM de Pichátaro, al igual que muchas instituciones educativas, genera una cantidad significativa de residuos de biomasa, como restos de poda, hojas, ramas y otros materiales orgánicos. Estos residuos suelen ser desechados o quemados, logrando muy poco beneficio, la evaluación energética permite aprovechar estos recursos locales para la generación de energía limpia y sostenible.

Ya que la generación de energía a partir de residuos de biomasa puede ayudar a reducir los costos de energía del plantel, la inversión inicial en infraestructura y tecnología para la

conversión de biomasa en biocombustibles sólidos puede amortizarse a largo plazo, lo que resulta en ahorros significativos en facturas de energía eléctrica o calefacción.

En términos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental; la biomasa es una fuente de energía renovable y de bajo impacto ambiental, la generación de bioenergía a partir de residuos de biomasa contribuye a la sostenibilidad ambiental, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero y disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles (Duquino Rojas, 2018).

Por otra parte, la educación y sensibilización, sobre la implementación de un sistema de bioenergía en el plantel ofrece oportunidades educativas significativas, los estudiantes pueden aprender sobre fuentes de energía renovable y tecnologías limpias, contribuyendo a su formación académica y conciencia ambiental. Así mismo se prevé en un futuro no muy lejano que la independencia energética, por la generación de bioenergía a partir de residuos de biomasa también puede contribuir a la independencia energética del plantel COBAEM, reduciendo la dependencia de fuentes externas de energía y garantizando un suministro más estable.

Es por ello que la presente investigación sobre la evaluación energética de los residuos de biomasa para la generación de bioenergía a través de biocombustibles sólidos en el COBAEM plantel Pichátaro representa una oportunidad para mejorar la eficiencia energética, reducir costos, fomentar la sostenibilidad ambiental, educar a la comunidad y promover el desarrollo económico local, esta iniciativa contribuirá al bienestar del plantel y a la responsabilidad ambiental, al tiempo que alinea a la institución con las metas y políticas de energía sostenible a nivel local y global. Este estudio proporcionará una base sólida para la toma de decisiones informadas sobre la implementación de tecnologías de bioenergía en Pichátaro y servirá como un ejemplo para otras comunidades que buscan abordar desafíos energéticos y medioambientales similares.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar de manera integral la viabilidad técnica, económica y ambiental de la utilización de los residuos de biomasa disponibles en el Colegio de Bachilleres (COBAEM) plantel Pichátaro para la generación de biocombustibles sólidos. Este estudio tiene como propósito principal determinar la eficiencia de la conversión de residuos de biomasa en biocombustibles sólidos, analizar y evaluar las implicaciones ambientales asociadas con esta forma de generación de energía, los resultados de esta investigación proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones respecto a la implementación de sistemas de bioenergía sostenible en el COBAEM plantel Pichátaro, con el fin de contribuir a la reducción de la huella de carbono y promover prácticas más sostenibles en el ámbito educativo.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Determinar a través de un diagnóstico el potencial de residuos de biomasa en el plantel Pichátaro del COBAEM, incluyendo la cantidad y tipo de biomasa generada por año.
2. Realizar una caracterización físico-química de los residuos de biomasa del plantel para ser utilizados en biocombustibles sólidos, determinando la eficiencia de estos residuos de biomasa, en biocombustibles sólidos.
3. Realizar sensibilización ambiental en el plantel para el aprovechamiento de residuos de biomasa con fines energéticos.

1.6. Hipótesis

Los residuos de biomasa del plantel San Francisco Pichátaro del COBAEM, pueden ser utilizados como materia prima para la producción de bioenergía, que puedan ser utilizados en biocombustibles sólidos, a través de su validación con la caracterización físico-química pertinente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. La sustentabilidad.

La sustentabilidad se ha convertido en un modelo tanto en los programas agroecológicos como en las políticas referidas al Desarrollo Rural. Diversas propuestas metodológicas han surgido para evaluar la sustentabilidad en diversas escalas, tanto a nivel de país, como nivel regional, local, incluso a nivel de parcela o recursos específico, La Metodología de Evaluación de Sustentabilidad a partir de indicadores Locales para el diseño de Programas Agroecológicos, basados en marcos de análisis como (Smyth and Dumanski, 1993); el Marco Teórico para la Definición de los Indicadores de Sustentabilidad (Hünemeyer, De-Camino Y Müller, 1997) , permite la construcción de una definición propia de sustentabilidad, el diseño de indicadores para monitorearlo, así como la evaluación y proyección de accesiones tendientes a mejorar el estado de sustentabilidad a nivel de sus sistemas productivos (Vargas Alvarez et al., 2013).

Tres componentes fundamentales, lo social y lo ambiental que busca a sustentabilidad.

Un caso de estudio se ha valuado la sustentabilidad a 12 agroecosistemas en la provincia del Sumapaz en Cundinamarca, a través de la metodología del Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales incorporando la Sustentabilidad. Los atributos estimados fueron: lo productivo, confiable, adaptable, autogestión, equidad, estabilidad y resiliencia. Se ha hecho investigación para identificar estrategias para mejorar la relación entre los agroecosistemas y las prácticas agroecológicas y así poder contribuir con la preservación sustentable de los sistemas de producción. La descripción de variables biofísicas y socioeconómicas se consiguió de una revisión de fuentes primarias y secundarias: visita de campo, entrevistas, recorridos guiados y cartografía social. Se evaluaron los agroecosistemas a través de indicadores de sustentabilidad, dentro de las dimensiones económica, social y ambiental. Los resultados demuestran que son “medianamente sustentables”, con índices positivos que van de 62 a 74 %, debido a las condiciones socioeconómicas y productivas en el ámbito de la finca, las cuales son operadas por mano de obra de la familia, lo que genera una estabilidad en cuanto al conocimiento de la zona, paisaje, fertilidad, coberturas vegetales, fuentes de agua y de la vegetación. A su vez, los agroecosistemas albergan gran biodiversidad y ofrecen una amplia gama de beneficios a través de los ecosistemas, lo cual incentiva la incorporación de prácticas agroecológicas, apropia tecnologías para la utilización de fuentes renovables de energía y contribuye gradualmente al logro de la autosuficiencia alimentaria, aportando así a la sustentabilidad (Albarracín-Zaidiza et al., 2019).

Desde 1971, a raíz de la reunión de expertos sobre medio ambiente y desarrollo celebrada en Founex, Suiza, muchas de las discusiones sobre el tema del desarrollo, tanto en el ámbito

internacional y nacional, han sido permeadas por la búsqueda de patrones de desarrollo que efectivamente puedan conciliar las necesidades de sostenimiento de los sistemas naturales del planeta con las necesidades sociales y económicas. En este sentido, los esfuerzos de investigación, de diseño de políticas y la puesta en marcha de actividades que buscan la construcción de procesos de desarrollo sustentables han sido vastos y variados. A la fecha, son importantes los avances realizados en cuanto a nuestro conocimiento de las áreas ambientales, ecológicas y económicas de la sustentabilidad. Sin embargo, los aspectos sociales involucrados en la construcción de la misma han sido poco trabajados y aún es mucho lo que queda por hacer. En este artículo se hace referencia a las dimensiones sociales de la sustentabilidad, haciendo énfasis en las relaciones de género involucradas en los procesos de acceso, uso y manejo de recursos naturales, económicos y sociales. Se presenta una propuesta metodológica para analizar las relaciones sociales y de género involucradas en el binomio sociedad-naturaleza. Considerando las unidades domésticas para su análisis, el estudio de las relaciones intradomésticas nos permiten acercarnos al estudio de las dimensiones sociales de la sustentabilidad y explorar, desde una perspectiva social y de género, las causas, las consecuencias y el manejo de los cambios ambientales (Turba, 2018).

2.2. La sustentabilidad energética

La política pública ambiental urbana debe fundamentarse en la complejidad de la naturaleza y de sus procesos internos de producción. Tal complejidad desborda la instrumentalidad a la que ha sido reducida desde la tecnocracia y el modelo económico, y plantea la exigencia de aparatos de aprehensión más integrales y completos, capaces de dar cuenta de la amplia red de relaciones que se entrelaza en los diversos fenómenos ambientales que tienen lugar en los territorios. Es allí donde se justifica el marco de acción constituido por la sustentabilidad ambiental urbana, un discurso que responde en Latinoamérica a dichas problemáticas del medio ambiente, pues es una alternativa arraigada en la realidad social, cultural, geográfica, política y económica de nuestras comunidades y pueblos. Se revisa de manera crítica la perspectiva dominante: el discurso del desarrollo sostenible impuesto desde los organismos de control transnacionales, los cuales impiden generar nuevas opciones en el universo de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza (Duquino Rojas, 2018).

En una publicación se presentan los resultados y logros de la iniciativa “Observatorio Regional sobre Energías Sostenibles” de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (véase Figura 2.1) se constituyó inicialmente como un proyecto financiado por la Cuenta de las Naciones Unidas para el Desarrollo y, en la actualidad, es un referente regional que ha ayudado a los países a desarrollar capacidades técnicas para el monitoreo del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, a fin de garantizar el acceso de la población a una energía asequible, segura, sostenible y moderna en el marco de la Agenda 2030 (Lisperguer & Pavez, 2021).

El documento incluye un análisis de las tendencias regional y subregional desde la perspectiva del acceso, las energías renovables y la eficiencia energética, así como estudios específicos de países como la Argentina, Bolivia, Cuba, Guyana, Panamá y el Uruguay. Proporciona también abundante información y datos estadísticos para la elaboración de nuevos trabajos o estudios sustantivos sobre el tema. Su clara estructura facilitaría, por ejemplo, la realización de un seguimiento muy estrecho de la evolución de la región respecto del ODS 7 (Lisperguer & Pavez, 2021).

Con el tiempo se han incorporado variables, especialmente en los conceptos de desarrollo sustentable, que reflejan la importancia de la conservación del ambiente y los recursos naturales. Este trabajo presenta una investigación analítica, con base en una revisión documental, que permite formar una visión de los factores que conforman la complejidad de la formulación de las políticas energéticas y su evaluación, mediante los principios del pensamiento complejo, destacando su valor como herramienta para la comprensión de este proceso (Acevedo Rueda et al., 2020).



Figura 2.1 Características de la energía renovable

<https://aprende.com/wp-content/uploads/2021/07/caracteristicas-de-las-energias-renovables.jpg>

2.3. La agenda 2030

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas contempla Objetivos de Desarrollo Sostenible 17 (ODS) y 169 submetas que son referencias globales para la transición hacia la sostenibilidad y sustentabilidad. La agenda reconoce que diferentes temas como la pobreza, la salud, el hambre, la educación, la igualdad de género, la equidad, la degradación ambiental, entre otros, están relacionados y, por lo tanto, sólo pueden abordarse juntos. La implementación

de los ODS como un “todo indivisible” representa el verdadero reto para el éxito de la Agenda 2030. El principal desafío es lograr un enfoque más integrado del desarrollo sostenible que abarque nuevos marcos de gobernanza para permitir y gestionar transformaciones sistémicas. Este número temático aborda la cuestión de si los ODS desencadenan procesos de transformación social, y cómo, para los cuales la cooperación entre actores estatales y no estatales en todos los niveles políticos (global, regional, nacional, subnacional), en diferentes esferas sociales (política, sociedad y economía) y en diversos sectores (energía, transporte, alimentación, vivienda, etc.) son indispensables. La Agenda 2030 y los ODS brindando una visión general de la arquitectura de la agenda y los desafíos clave de la fase actual de implementación. En un segundo paso, presentamos las once contribuciones que componen el número temático agrupándolas en torno a tres temas: integración, desafíos de gobernanza e implementación (Weiland et al., 2021).

La Agenda 2030 y sus objetivos de desarrollo sostenible, (véase Figura 2.2) así como también la responsabilidad social empresarial, buscan el cambio que conduzca a un progreso sostenible en los ámbitos, social, económico y ambiental. Esto implica un compromiso donde actores como el Estado, comunidad civil, academia, empresas privadas y públicas, juegan un papel fundamental. Las investigaciones deben describir la responsabilidad social empresarial a partir de la Agenda 2030. El paradigma cualitativo utiliza la revisión documental, teórica y jurídica. Como resultado, existe un interés acentuado de las empresas hacia el cumplimiento de la responsabilidad social, encaminando acciones cónsonas con el desarrollo sostenible y los objetivos de desarrollo declarados a nivel mundial. A pesar de ello, se requiere de mayor socialización y empoderamiento de la normativa contemplada en la Agenda 2030, para evitar el incumplimiento cabal de sus objetivos. La responsabilidad social empresarial, responde a los Objetivos de Desarrollo Sustentables y aporta elementos significativos para las dimensiones económicas, políticas, sociales, ambientales y éticas de las empresas, quienes deben asumirlas como ejes transversales de su sistema de gestión; lo cual permitirá potenciar el desarrollo de cada país (Lisperguer & Pavez, 2021).



Figura 2.2 Objetivos agenda 2030

https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/sites/3/2015/01/S-SDG-Poster_-Letter.jpg

2.3.1. Objetivo número 7

Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas es el de asegurar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Este objetivo 7 se ha visto aumentado en su importancia debido al cambio climático, a la Guerra de Ucrania y a la crisis generada en cuanto a la económica y energética en la que estamos sumidos. Se estudian los factores que influyen en la aceptación de energía que tienen la consideración de verdes y no contaminantes: las renovables (Simón, 2023).

Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible y las situaciones jurídicas creadas al amparo de ésta, en el ámbito internacional. Se analiza en especial el objetivo 7 y sus dos pilares fundamentales, el aumento de la energía renovable y la eficiencia energética asegurando el acceso a dichas energías en el ámbito de la Unión Europea. En el ámbito a que hace referencia el objetivo 7 se ponen de manifiesto las grandes diferencias entre los estados de la comunidad internacional no sólo por lo que al grado de cumplimiento respecta sino al grado de compromiso; así algunos estados están más aventajados que otros por contar con más recursos para llevar a cabo el cumplimiento, aunque de otro lado, existan otros que no quieren comprometerse ratificando los grandes convenios internacionales. La normativa específica de la Unión Europea dirigida a cumplir las metas marcadas pone de relieve que en su conjunto

el grado de cumplimiento se ha alcanzado ya. Por último, en lo que se refiere al nacional. (Gimenez,2017).

La energía es fundamental para casi todos los desafíos, oportunidades y desarrollo en el mundo: atender las necesidades de las mismas en la actividad humana, en el empleo, seguridad, el cambio climático, producción de alimentos, infraestructura, tecnología; y por, sobre todo, como una necesidad básica, para el progreso social tiene una visión disciplinar integrada a nivel regional. Para el cumplimiento del ODS 7 y sus metas, desde la academia, las acciones hacia las buenas prácticas del ODS 7 se enfoca en la meta: “De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a las energías sustentables, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes, y gestionar la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias”(Pecci-Oviedo, 2020).

2.4. La energía renovable

Durante los últimos años, varios países alrededor del mundo vienen impulsando iniciativas para incluir en sus sistemas de generación recursos renovables no convencionales en reemplazo de la energía térmica convencional, como medida de acción contra los efectos adversos del cambio climático, sin embargo tales medidas normalmente encuentran barreras o limitaciones para su aplicación, por lo que el análisis de mecanismos de incentivos y la evaluación de la experiencia a nivel internacional es importante para continuar el proceso de incorporación de este tipo de tecnologías. Se hacen esfuerzos por algunos organismos internacionales para generar estrategias para la penetración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Son analizados los mecanismos de integración implementados en diversas regiones del mundo; para este propósito, se enumeran los mecanismos de incentivos utilizados y sus definiciones más comunes, se analiza la evolución de este tipo de tecnologías en algunas regiones del mundo, se analizan las barreras y limitaciones que enfrentan las energías renovables para su desarrollo, y se proponen recomendaciones para impulsarlas y aplicarlas (Arias et al., 2022).

2.5. La ecotecnología

En la actualidad, las tecnologías mayormente han impuesto un modelo tecnológico occidental que suplanta o propone como alternativa a los conocimientos de las culturas autóctonas por considerarlos de bajo rendimiento, aunque no lo son, y provocan grandes daños al ambiente (contaminación local, drenaje de agua negras hacia ríos y espacios circundantes, entre otras). Muchos autores y colectivos, ven imprescindible entonces volver a las fuentes en relación a las técnicas y tecnologías sustentables (Alonso & Florio, 1979).

Dentro de las afectaciones a la naturaleza han afectado el acceso de agua potable. En la última década esta situación ha llevado al uso intensificado de las tecnologías ecoamigables en las edificaciones de varias ciudades alrededor del mundo con el fin de minimizar su impacto.

trabajo de investigación tiene como objetivo describir la importancia del uso de las ecotecnologías de aprovechamiento hídrico para el medio ambiente, la economía y la sociedad, concentrando el análisis en las ecotecnologías de techos verdes y tratamiento de aguas residuales utilizadas en las viviendas. Comprender el uso de ambas ecotecnologías, techos verdes y tratamiento de aguas residuales, en la actualidad y su factibilidad de aplicación considerando las condiciones climáticas y la estructura base sobre la que se construye, permite entender los beneficios de su aprovechamiento y las limitaciones que enfrentan para aplicarlas en las viviendas de Lima Metropolitana. La metodología de investigación tuvo un enfoque cualitativo. Se recolectó información a través de la búsqueda especializada de literatura relacionada en torno a ecotecnologías de aprovechamiento hídrico, especialmente en el uso de ecotecnologías de techos verdes y tratamiento de aguas residuales. Posteriormente, se realizaron entrevistas a especialistas en el ámbito de las construcciones sostenibles, como instrumento de validación de este estudio para comprender el funcionamiento de las ecotecnologías hídricas en edificaciones donde se han implementado con éxito y, finalmente, se analizó la información mediante la técnica de análisis de contenido. El resultado de la investigación observó la factibilidad de implementar ambas ecotecnologías en los proyectos nuevos y viviendas ya existentes en Lima Metropolitana. Asimismo, se halló que su aplicación contribuye a mitigar el impacto negativo generado por la falta de áreas verdes, la escasez de agua potable, la contaminación del aire y los peligros climáticos que presentan la ciudad de Lima. La principal recomendación del estudio fue promover el desarrollo de proyectos de vivienda con corte sostenible (véase Figura 2.3) en Lima Metropolitana a través de políticas graduales y el trabajo conjunto de las municipalidades y el sector privado, impulsando la implementación de ecotecnologías de tratamiento de aguas residuales para el riego de vegetación de techos verdes (Ameghino, 2021).



Figura 2.3 Ecotecnologías

<https://bosquedeniebla.com.mx/wp-content/uploads/2019/08/Portada-ecotecnologias.jpg>

2.5.1. La energía solar

Desde los principios de la historia, el sol ha acompañado con su luz y calor la actividad humana. De hecho, en las culturas originarias lo consideraban como un elemento único pues, al contrario de las estrellas, que aparecían fijas en el cielo, cada día trazaba el curso desde el amanecer hasta el anochecer, como única fuente de luz y calor. Por ello le atribuyeron propiedades excepcionales y construyeron observatorios y lugares de culto como los megalíticos de Stonehenge en Inglaterra (2200-1600 a.C.) y Carnac (6000-2000 a.C.) en Francia. Aún más, el sol ha sido considerado por diversas culturas como un dios, como es el caso de Amon-Ra, dios del sol y de la vida en el antiguo Egipto; Helios en la mitología griega; Tonatiuh o Tonatiuh téotl para los aztecas; Inti para los incas del Tawantinsuyu y Willkakuti para los aymaras, que esperaban cada 21 de junio “el retorno del Sol”, para así comenzar un nuevo tiempo en la vida de las mujeres y hombres del altiplano andino (Doussoulín-Escobar & Chalco-Cano, 2018).

El Sol se formó hace aproximadamente 4.600 millones de años y la aparición de los primeros primates sobre la Tierra, que fueron la base para la evolución de la especie humana actual, ocurrió hace unos 70 millones de años. En el periodo neolítico, la economía de las sociedades humanas evolucionó desde las primeras actividades humanas como la pesca, la caza y la recolección de frutos hacia el desarrollo progresivo del cultivo de la tierra, cuyo inicio se sitúa 10.000 a.C. Este proceso se atribuye a crecientes necesidades de alimentación de una población ya en aumento, la cual se basó inicialmente en diversas gramíneas como el farro, el trigo escanda y la cebada, y luego los guisantes, lentejas, garbanzos y lino. Ya en aquella época y tal vez en forma intuitiva, el ser humano consideraba la influencia del sol, la luna y otros astros sobre las distintas tareas agrícolas (Doussoulín-Escobar & Chalco-Cano, 2018).

En la Antigua Grecia, Aristóteles propuso una hipótesis que sugería que la luz solar estaba directamente relacionada con el desarrollo del color verde de las hojas de las plantas, idea que inicialmente no fue considerada. Diversos científicos avanzaron progresivamente a través de los siglos en distintos frentes del conocimiento, respecto a la fotosíntesis, y en el año 1942 el químico Melvin Calvin detectó la secuencia de reacciones químicas generadas por las plantas al transformar dióxido de carbono gaseoso y agua en oxígeno e hidratos de carbono. Ello le valió el Premio Nobel de Química 1961. Este descubrimiento, junto con otros notables avances en la ciencia, ha permitido determinar que la luz solar, además de cumplir un rol crucial en la fotosíntesis, es determinante en otros procesos para el desarrollo y crecimiento vegetal (Doussoulín-Escobar & Chalco-Cano, 2018).

Por ello, aun cuando hay avances en forma importante en el desarrollo de la agricultura, todavía existe un potencial solo parcialmente utilizado, en lo pertinente al cabal aprovechamiento de las altas condiciones de irradiación solar en vastas extensiones. Ello ineludiblemente debe asociarse con aplicaciones tecnológicas avanzadas en cada uno de los

factores productivos, particularmente aquellos asociados al ecosistema árido desértico imperante, como el uso inteligente del agua y el manejo del estrés iónico, para el logro de resultados notables en términos de producción y productividad agrícola, en forma sostenible y rentable. A nivel internacional, la producción de cultivos en invernaderos, en zonas áridas, sin duda ya no es noticia. Sin embargo, es importante destacar la avanzada tecnología que ya se está aplicando en la región árida australiana de Port Augusta, con la puesta en marcha de prototipos de invernaderos y con el aporte de la luz del sol proporciona un buen desarrollo de las plantas. Lo brevemente indicado permite visualizar los notables desafíos, oportunidades y proyección futura para regiones en este ámbito, más aún en el escenario de incerteza global determinada por el cambio climático, focalizando estrategias corporativas plasmadas en crecientes emprendimientos e inversiones de desarrollo agrícola en distintas áreas, iniciativas insospechadas en décadas pasadas (Doussoulin-Escobar & Chalco-Cano, 2018).

El presente proyecto de investigación, la luz solar tiene una importancia por su aporte en la fotosíntesis, que ayuda a las plantas a crecer y generar biomasa, para que posteriormente se utilice para generar bioenergía utilizada en la generación de bioenergía, que puede ser utilizado en actividades humanas como sería cocción de alimentos y calentamiento de agua.

2.5.2. La energía de la biomasa

La biomasa, entendida como materia orgánica generada en los procesos biológicos, y al alcance del hombre, ha sido utilizada con fines energéticos desde el descubrimiento del fuego. Fue el homo erectus, un antecesor del homo sapiens, quien realizó ese trascendental descubrimiento hace cerca de un millón de años. El fuego le proporcionó y permitió luz para la vida nocturna y para las cavernas, calor para protegerse de bajas temperaturas, realizar la cocción de sus alimentos, recurso para la caza, defensa ante el ataque de las fieras y de los rivales. Una vez que nuestro ancestro obtuvo el dominio del fuego, comenzó su carrera desenfrenada hacia la humanización, tanto al perfeccionar la vida en comunidades, fortalecida al amparo del hogar y enriquecida con interacciones sociales, como por la influencia de una mejor dieta para el desarrollo y calidad de vida. Por tanto, es evidente la importancia que para el hombre ha tenido y tiene ese recurso energético primario, que es la biomasa (Velázquez, 2018).

La combustión de la biomasa es un proceso esencial para la generación de la energía térmica demandada por las plantas de beneficio. Por lo tanto, tener claridad sobre los conceptos principales de este importante proceso es indispensable para gestionar un control eficiente en la operación de un sistema de combustión. Este artículo explica la definición de la combustión y la ruta de combustión de biomasa e identifica y describe las propiedades de la combustión: físicas, químicas, térmicas y minerales. Además, se exponen las generalidades de la combustión de lecho fijo, donde se presentan las configuraciones y tecnologías disponibles. Posteriormente, se realiza una revisión de la tecnología de lecho fluidizado,

identificando tres referentes: lecho fluidizado circulatorio, lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado presurizado. Se muestran las generalidades de la combustión de combustible pulverizado, la cual es una tecnología habitualmente usada en co-combustión. Se realiza un análisis comparativo entre las tecnologías estudiadas, resaltando las ventajas y desventajas de cada una de estas de acuerdo con sus principios de operación. Por último, se realiza una estimación de las oportunidades de mejora a través de la generación de excedentes de energía térmica, estableciendo eficiencias de combustión para diferentes flujos de fibra y cuesco (Berrera, et al., 218).

La utilización de la biomasa como recurso energético está adquiriendo especial relevancia en las estructuras económicas y de investigación, y a raíz de esto muchos proyectos se están desarrollando para este fin (véase Figura 2.4). La mayoría de ellos se centran en los procesos transformación de los materiales en biocombustibles y en los procesos de generación energética a partir de los mismos. No obstante, en un sistema tiene especial importancia los métodos de obtención de las materias primas y su logística, sin los cuales cualquier planificación energética quedaría incompleta. Se debe de hacer un análisis global de toda la cadena de aprovechamiento, desde los métodos de valoración y cuantificación de la biomasa disponible en los diferentes sistemas, diseño de las técnicas de extracción, cosecha y logística, hasta el diseño de los sistemas de transformación de recursos biomásicos en biocombustibles y su aprovechamiento energético. En ella se describen los sistemas de extracción, se plantea la metodología empleada para su valoración, y los principios de diseño de instalaciones (Velazquez, 218).



Figura 2.4 Ciclo de la biomasa

2.6. La bioenergía

Una de las prioridades del mundo actual es la generación de bioenergéticos sustentables y amigables con el medio ambiente, para lo cual son necesarios cambios en los modelos de producción y utilización de energía. El uso de residuos forestales como una fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos representa una alternativa potencial, ya que genera un biocombustible menos contaminante en comparación con los de origen fósil (véase Figura 2.5). Además, mientras que el calor y la electricidad pueden ser generados por otras alternativas renovables como viento, sol y agua, la producción de combustibles y la síntesis de productos químicos requieren transformar la biomasa. La elección de la estrategia de conversión depende del tipo, propiedades y cantidad de la biomasa disponible, de los requerimientos de uso, así como de los estándares ambientales y condiciones económicas. El objetivo del presente trabajo es describir los diferentes procesos a través de los cuales se puede obtener energía a partir de residuos de biomasa forestal, así como el potencial que tienen estos residuos en la producción de los diferentes tipos de bioenergéticos. Asimismo, se describen los desafíos y problemas que aún siguen sin resolver, como lo son la recolección de residuos, escalamiento y costos de producción (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018).

La energía es un insumo fundamental del tejido productivo y la bioenergía está destinada a ser un elemento central en esta nueva bioeconomía. El paulatino remplazo de los combustibles fósiles por biocombustibles, se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético actual y la bioenergía está llamada a satisfacer una proporción cada vez mayor de nuestras necesidades energéticas, tanto en la automoción como de demanda térmica y eléctrica. Al ser una importante fuente de creación de puestos de trabajo, especialmente en áreas rurales a nivel local y regional, la bioenergía puede contribuir a la cohesión social, realizando una valiosa aportación a la sociedad más allá de su genuina contribución energética. En este capítulo, se describe la biomasa como recurso energético, analizando las materias primas y las tecnologías para su transformación en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Asimismo, se describen las distintas aplicaciones a las que se destinan los biocombustibles (calor, electricidad y combustibles de transporte) y su grado de penetración en el mercado. Por último, se analizan los aspectos medioambientales, sociales y económicos de la producción y uso energético de la biomasa, con especial mención a las controversias generadas sobre la potencial competencia de la producción de biomasa a gran escala con el suministro de alimentos y el acceso al agua y la tierra (Perdices, 2017).



Figura 2.5 Energía de la Madera

<https://www.forestmaderero.com/wp-content/uploads/2018/01/Horno-de-lena.jpg>

2.7. Los biocombustibles

Los biocombustibles jugarán un papel clave en la energía del futuro, especialmente en el sector del transporte, reduciendo la actual dependencia del petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a este sector. La biomasa, y en particular la biomasa, es la materia prima esencial para la producción de biocombustibles renovables. Por tanto, es necesario desarrollar tecnologías innovadoras, eficientes y sostenibles para la valorización de la biomasa en una biorrefinería integrada. Este artículo resume algunas de las líneas de investigación y proyectos más relevantes en este campo que están desarrollando los grupos de investigación que conforman la línea de trabajo dedicada a Biocombustibles dentro de la Plataforma Temática Interdisciplinar del CSIC PTI Movilidad 2030 (Campo-Matin, et al., 2024).

Los biocombustibles son una fuente renovable de combustibles orgánicos cada vez más investigada y demandada. En el presente artículo se revisan diferentes estrategias para la producción de biocombustibles. Se describe principalmente la producción de bioetanol y de biodiésel a partir de diversas materias primas, así como su obtención mediante el uso de fluidos supercríticos. Las técnicas más usadas en la generación secundaria de biocombustibles son la torrefacción, licuación, pirólisis y gasificación. Además, se presentan resultados experimentales propios donde se puede observar la producción de biodiésel mediante transesterificación a partir de aceite de cocina usado (Chávez Altamirano et al., 2021).

El propósito del estudio de revisión bibliográfica es analizar el biocombustible obtenido a partir de residuos orgánicos como parte de la alternativa verde para ayudar al medio ambiente, la biotecnología brinda diferentes formas de generar energía renovable, entre las que destaca la producción de bioetanol. El proceso de obtención del biocombustible es la etapa de fermentación del alcohol, que es una reacción biológica que se lleva a cabo en

ausencia de aire, que convierte los azúcares en alcohol (C_2H_5OH) y dióxido de carbono (CO_2). El desarrollo de los combustibles fósiles es la base de la sociedad, siempre que sean fuentes de energía renovables obtenidas a partir de residuos orgánicos, lo que menciona al banano, fuente importante para la producción de bioetanol, por contener un alto contenido en carbohidratos. Los biocombustibles son una fuente de progreso a nivel industrial y agrícola, y una opción energética de origen renovables y la reducción de gases efecto invernadero que se da por de la descomposición de desechos orgánicos la cual provoca que sea una prometedora opción para la suplencia de combustibles fósiles para la valorización energética de residuos orgánicos en áreas deshabitadas, urbanas y agroindustriales (Chávez Altamirano et al., 2021).

2.7.1. Los biocombustibles líquidos

Se analiza la situación climática actual y sus distintos escenarios futuros y se describe el rol de los biocombustibles en la descarbonización. Además, se examinan los biocombustibles líquidos más usados y aquellos con utilización potencial en los transportes marítimo y aéreo. Asimismo, se aborda el establecimiento de la institucionalidad relativa a los biocombustibles, comenzando con el análisis de los actores involucrados. Finalmente se abordan tres secciones: la primera, donde se revisa la evolución reciente de los principales indicadores asociados a los biocombustibles líquidos, incluidos los efectos de la pandemia y las restricciones de movilidad durante 2020; la segunda sección, se centra en las perspectivas; y la tercera, hace hincapié en algunos estudios de caso pertinentes para la formulación de políticas públicas (Torroba, 2021).

2.7.2. Los biocombustibles gaseosos

Se analiza la situación climática actual y sus distintos escenarios futuros y se describe el rol de los biocombustibles en la descarbonización. Además, se examinan los biocombustibles líquidos más usados y aquellos con utilización potencial en los transportes marítimo y aéreo. Asimismo, se aborda el establecimiento de la institucionalidad relativa a los biocombustibles, comenzando con el análisis de los actores involucrados. Finalmente se abordan tres secciones: la primera, donde se revisa la evolución reciente de los principales indicadores asociados a los biocombustibles líquidos, incluidos los efectos de la pandemia y las restricciones de movilidad durante 2020; la segunda sección, se centra en las perspectivas; y la tercera, hace hincapié en algunos estudios de caso pertinentes para la formulación de políticas públicas (Riojas, et al,2023).

2.7.3. Los biocombustibles sólidos

Para México, los pronósticos indican que el consumo de energía ira aumentará, principalmente debido al incremento poblacional. Por otra parte, la mayor parte de la energía que se emplea proviene de fuentes de residuos fósiles, cuya producción se encuentra en declive. Por ello es importante buscar nuevas fuentes energéticas que permitan producir la energía que se necesita, pero de manera sostenible y sustentable. En este contexto, el uso de

residuos agroindustriales representa una alternativa con potencial para la fabricación de biocombustibles sólidos y comprimidos, los cuales se pueden emplear para generar energía eléctrica y/o calorífica, para la utilización de la actividad humana. Como los pellets, un tipo de biocombustible sólido, pueden emplearse para la generación de energía eléctrica, reemplazando al carbón de origen vegetal. Por ello, utilizar de pellets elaborados a partir de residuos agroindustriales son el objeto del presente artículo, así como el efecto de su potencial uso en México sobre el precio de generación de la energía eléctrica (Ríos-Badrán et al. - 2019).

Biocombustible sólido, se obtiene mediante la compactación o densificación de residuos, no contienen aglutinantes, aditivos ni otra sustancia que puedan deteriorar las calderas e instalaciones de calefacción, su contenido es hecho de residuos de los procesos agroindustriales, la lignina actúa como aglutinante natural. Como objetivo principal es la preparación y caracterización física y química de la briqueta para ser utilizadas como biocombustible sólido y generar bioenergía, a los residuos agroindustriales como: cascarilla de arroz, polvillo, cuesco y aserrín. Común diseño de bloques completamente al azar y un arreglo factorial ABC que constó de 12 tratamientos y 2 réplicas lo que corresponde a 24 tratamientos. Los factores de estudio: Factor A (tipo de mezcla), Factor B (forma de las briquetas) y Factor C (tamaño de las briquetas). Para el proceso de compactación se diseñó y fabricó moldes de formas cilíndricas y rectangulares de 10 y 15 cm de altura. Se determinó el mejor tratamiento mediante análisis físicos y químicos preparado con cáscara de arroz 4 %, polvillo 14 %, cuesco 10 %, Aserrín 12%, de forma cuadrada con un tamaño de 10 cm, con las siguientes características: 4.35% cenizas, 11% de humedad, poder calorífico 5268.20 Kcal/ kg, densidad 1 g/cm³ y una fuerza de compactación de 6.51 PSI; al ser este el tratamiento sobresaliente con las características deseadas en una briqueta, se procedió a realizar pruebas de temperatura y tiempo de combustión, donde alcanzo un rango de (127-240)°C en un tiempo de 30 minutos para ser totalmente calcinada (Villarreal Bastidas & Macías Vera, 2021).

2.8. Briquetas

Las briquetas son un tipo de combustible sólido utilizado principalmente para la calefacción y la cocina. Se fabrican a partir de materiales reciclados o residuos, como madera, aserrín, pulpa de papel, cáscara de almendras, entre otros. Estos materiales se presionan y compactan con altas presiones para formar bloques sólidos. Aunque tienen una forma similar a los pellets, las briquetas son algo más grandes y tienen una densidad mayor.

Algunas ventajas de las briquetas son más económicas que otros tipos de combustible, tienen una alta energía calorífica dependiendo del material con sean hechas, son fáciles de transportar y almacenar, y son sostenibles y respetuosas con el medio ambiente ya que se fabrican a partir de materiales reciclados. Sin embargo, también presentan algunos

inconvenientes, como que necesitan una mayor cantidad de espacio para almacenar y que pueden ser más difíciles de encender que otros tipos de combustible.

En resumen, las briquetas (véase Figura 2.6) se utilizan principalmente como combustible para calefacción y cocina. Pueden emplearse en estufas, chimeneas, hornos, calderas y hogares de leña. Además, su tamaño y forma las hacen muy fáciles de transportar y almacenar. Si tienes alguna otra pregunta o necesitas más detalles, no dudes en preguntar.

Se analizó el aprovechamiento energético de las briquetas como biocombustible sólido densificado, fabricadas con aserrín y corteza de pino, utilizando como aglutinante un residuo de la destilación de la resina de pino, a partir de residuos madereros de un aserradero. Para ello se elaboraron tres tipos de briquetas, con óptimas condiciones para su mejor utilización como las de la mezcla de aserrín con corteza de pino, compuestas de materia prima en diferente porcentaje. Con la fabricación de estas briquetas se procedió a determinar el análisis inmediato de las muestras, obteniéndose valores bajos de ceniza y humedad lo cual mejora sus propiedades como combustible. Se le realizaron pruebas de densidad, conductividad térmica y de resistencia, lográndose resultados deseados para mejorar su composición. Estableciendo que, la briketa que presenta las propiedades fisicoquímicas y mecánicas adecuadas, es la briketa de tipo II, o sea la de mezcla de aserrín con corteza (Balseca-Sampedro et al., 2018).



Figura 2.6 Briquetas

2.9. Gases de efecto invernadero

Uno de los impactos ambientales provocados por el sector agropecuario es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Los principales GEI emitidos desde el sector agropecuario son el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4). Estos gases elevaron mucho su concentración en el siglo XX. El sector ganadero es un importante emisor de GEI. La mayor contribución de N_2O se produce a partir de las excretas animales, principalmente las líquidas, mientras que el CH_4 , se produce principalmente por fermentación entérica, siendo esta última la emisión de mayor significación en sistemas pecuarios. La investigación de emisiones GEI del sector agropecuarios está en un estado

incipiente en Argentina. En las últimas décadas se registró un aumento en la demanda de productos procedentes del sector ganadero a nivel mundial, lo que se explica en parte por cambios en los patrones de consumo de alimentos de algunos sectores sociales. El Inventario Nacional de GEI muestra que un 49% de estas emisiones provienen del sector agropecuario, y dentro de este sector el 58% de los GEI son generados a partir de las distintas fuentes derivadas del ganado bajo pastoreo. Las estrategias de mitigación no necesariamente implican emitir menos GEI desde el sistema productivo, sino que pueden ser resultantes de una mayor productividad y, por ende, una menor cantidad de gas emitida por unidad de carne producida. Se resalta la importancia de contar con factores de emisión propios, medidos en nuestras condiciones y ambientes de producción (Costantini, 2018).

2.10. Gas metano

El gas natural, compuesto principalmente de metano, es el combustible fósil más limpio. Cuando el metano se produce a partir de fuentes no fósiles, como los residuos de alimentos y los residuos verdes, puede extraer literalmente el carbono del aire. El metano ofrece un gran beneficio al medio ambiente, ya que produce más energía calorífica y lumínica por masa que cualquier otro hidrocarburo o combustible fósil, como el carbón o la gasolina refinada a partir del petróleo, y produce mucho menos dióxido de carbono y otros contaminantes que contribuyen a la formación del smog y del aire insalubre. Esto quiere decir que cuanto más gas natural se use, en lugar de carbón, para generar electricidad o en lugar de gasolina para los automóviles, camiones o autobuses, menores serán las emisiones de gas de efecto invernadero o los contaminantes relacionados con el smog (Agostinetti et al., 2002).

Sin embargo, el metano liberado en la atmósfera antes de que se queme es perjudicial para el medio ambiente. Como puede atrapar el calor en la atmósfera, el metano contribuye al cambio climático ya que es un gas de efecto invernadero. Aunque la duración del metano en la atmósfera es relativamente corta comparada con la de otros gases de efecto invernadero, es más eficaz a la hora de atrapar el calor que esos otros gases. Y a pesar de que existen procesos naturales en el suelo y reacciones químicas en la atmósfera que ayudan a disminuir el metano de la atmósfera, es importante que todas las actividades que realiza el ser humano y que pueden contribuir a emitir metano en la atmósfera se realicen de forma que estas emisiones se reduzcan (Carmona, 2005).

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Proceso metodológico de la investigación

Para llevar a cabo la investigación propuesta sobre el aprovechamiento de los residuos de biomasa en el Colegio de Bachilleres de San Francisco Pichátaro, se estableció un proceso metodológico que permite garantizar la coherencia y rigor científico del estudio. Dicho proceso contempla desde la identificación y caracterización de los residuos generados, hasta el análisis de su potencial energético y su viabilidad como alternativa sostenible para la producción de biocombustibles sólidos.

La secuencia de actividades, así como las técnicas empleadas en cada una de las fases, se representan de manera esquemática en la Figura 3.1, la cual sintetiza la estrategia metodológica seguida en la investigación. Este diagrama constituye una guía visual que facilita la comprensión del procedimiento y asegura la reproducibilidad del estudio en contextos similares.

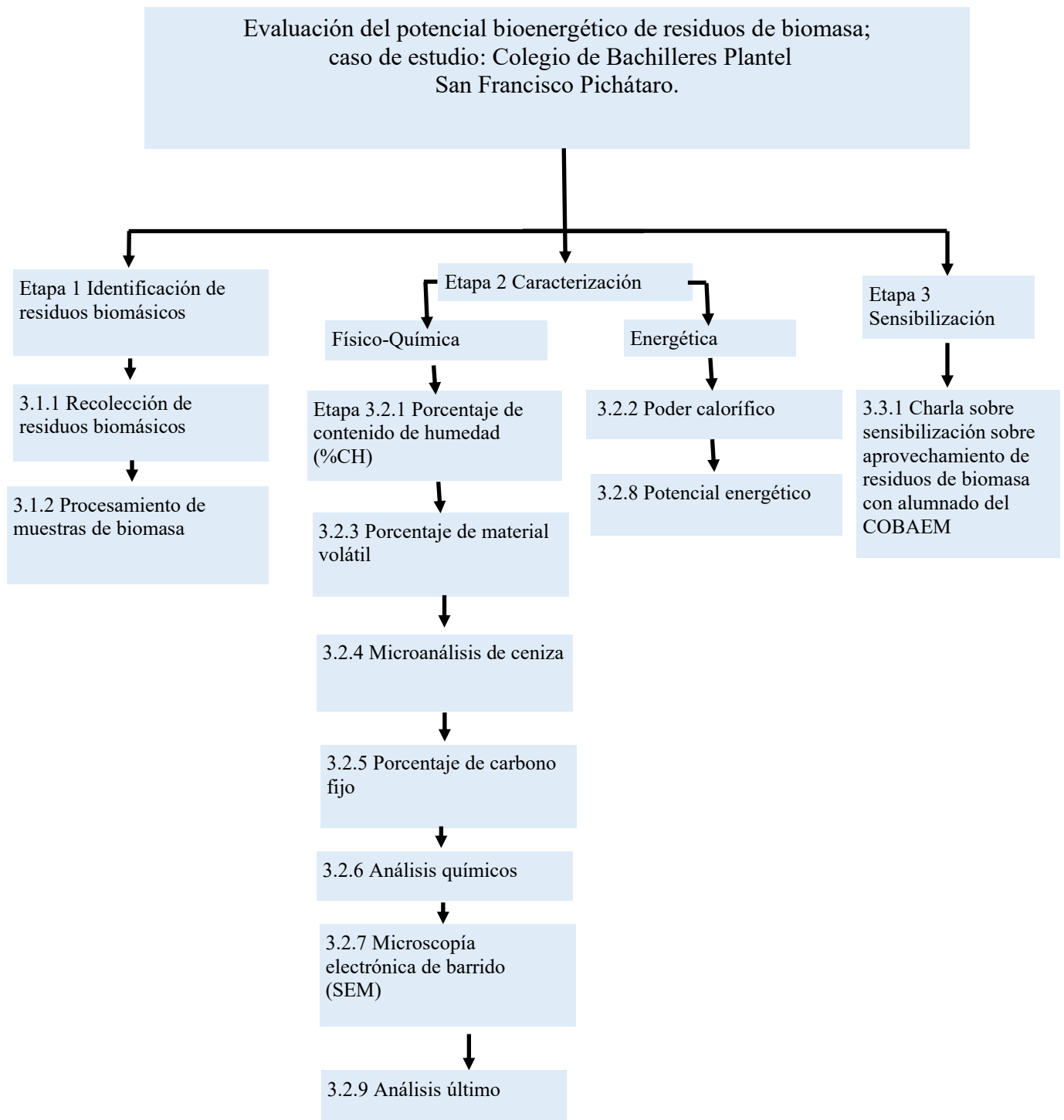


Figura 3.1. Diagrama metodológico

3.2. Etapa 1 identificación de residuos biomásicos

La presente investigación se realizó en el colegio de bachilleres del plantel San Francisco Pichátaro ver Figura 3.2, (19.56657367010953, -101.80232573355175) se revisó los posibles residuos biomásicos como es el caso de ramas de árboles como el pino, pastos, residuos de hojas etc. que se generan en la institución, y saber si son viables para la generación de bioenergía.

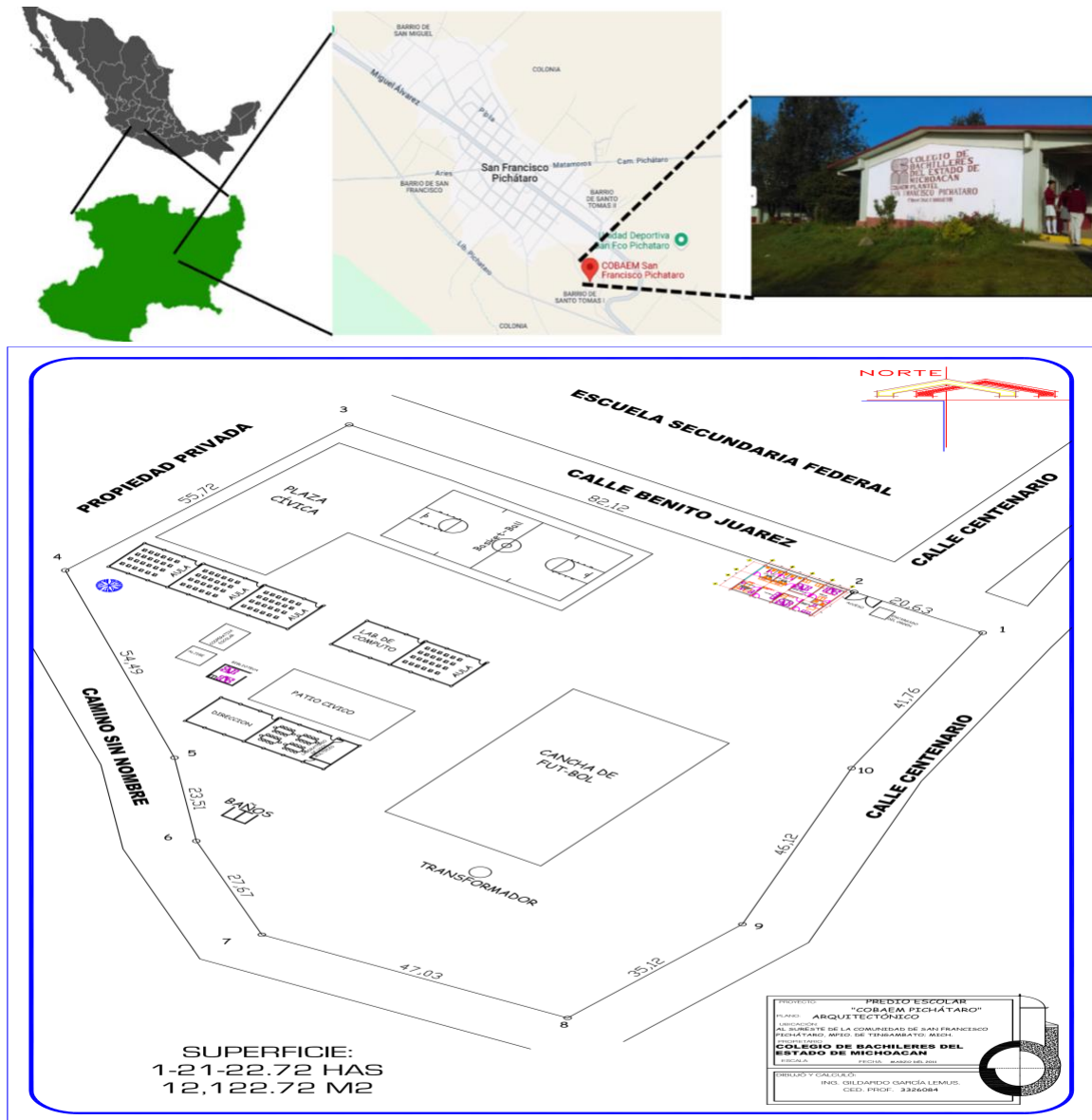


Figura 3.2. Área de estudio plano del COBAEM San Francisco Pichátaro.

Como se muestra en la Figura 3.2 la superficie del plantel 1.21 Has de las cuales se le restarían las superficies de construcciones y obtener la cantidad de áreas verdes que se utilizara para obtención de biomasa para generar biocombustibles sólidos.

3.2.1 Recolección de residuos

La recolección en el COBAEM Pichátaro, de los residuos identificados, se está realizando la recolección y el secado de la biomasa identificada y cuantificada, para saber su potencial energético y la cantidad en kilogramos de esta misma que se encuentra disponible dentro del colegio de bachilleres con la finalidad de saber si su potencial puede aportar condiciones para la generación de bioenergía.

La recolección de biomasa debe de ser planificada para asegurar que los residuos recolectados sean representativos y puedan ser usados para su análisis o procesamiento, tal y como se está realizando en esta investigación que se puede observar en la Figura 3.3.

Para la recolección de la muestra se utilizarán tijeras de podar, serrotes, contenedores y bolsas limpias, que se identificarán dependiendo la procedencia, tipo de biomasa fecha y hora de la muestra, se recolectara 4 kg, de cada tipo de biomasa disponible e identificada en el COBAEM Pichátaro, para hacer estas recolecciones es importante utilizar guantes y gafas, para proteger al recolector y la muestra.



Figura 3.3. Recolección de residuos biomásicos en COBAEM Pichataro

En la Figura 3.3, se muestra el proceso de recolección de muestras, en el inciso a se muestra residuos maderables, que se pueden utilizar para generar combustibles sólidos y ser utilizados para generar la bioenergía, en el inciso a) se muestran residuos de biomasa maderables que se utilizaran para generar biocombustibles sólidos, b) es el área del colegio de bachilleres del estado de Michoacán, donde se hará la recolección de residuos para la generación de biocombustibles sólidos. c) en este inciso se está haciendo la recolección de los residuos de biomasa d) se tiene los residuos de ramas para la realización de los distintos análisis y obtener los resultados.

3.2.2 Procesamiento de las muestras

El acondicionamiento de muestras de biomasa se realizó dependiendo de las pruebas de caracterización y obtención de las combinaciones que más poder calorífico generen y también menores emisiones tengan que sea menos el impacto al ambiente incluye el secado y triturado de las muestras para ser caracterizadas.

El acondicionamiento de muestras de biomasa implica varios pasos para preparar las muestras para análisis y procesamiento. Aquí tienes un resumen de los pasos a seguir más comunes:

1. **Recolección:** Se recolectan las muestras de biomasa del sitio de interés. Esto puede incluir residuos agrícolas, forestales, algas, entre otros.
2. **Secado:** Las muestras se secan para eliminar el contenido de humedad, lo cual es crucial para obtener mediciones precisas. El secado se puede realizar al aire libre, en estufas o mediante liofilización.
3. **Trituración / Molienda:** La biomasa seca se tritura o muele para reducir el tamaño de las partículas, facilitando el manejo y la homogeneidad de la muestra.
4. **Tamizado:** Se pasa la biomasa molida a través de tamices con malla 40, para obtener un tamaño de partícula uniforme, lo que es importante para análisis precisos.
5. **Almacenamiento:** Las muestras acondicionadas se almacenan en condiciones adecuadas (como en bolsas herméticas o frescos) para evitar la absorción de humedad y la contaminación.
6. **Caracterización:** Antes de los análisis específicos, a menudo se realiza una caracterización inicial de las muestras para determinar parámetros como la composición elemental (C, H, O, N, S), contenido de cenizas, contenido de Lignina y Celulosa, entre otros.

Estos pasos aseguran que las muestras de biomasa estén en condiciones óptimas para análisis químico, físicos y energético, como la determinación del contenido energético la producción de biocombustible, o la caracterización de materiales para aplicaciones industriales.

3.3. Etapa 2 Caracterización Físico-Químico y Energética

En esta etapa se describirá la metodología a seguir para caracterizar las muestras de biomasa recolectada a utilizar como bioenergía.

3.4. Determinación del contenido de humedad (%CH)

Porcentaje de contenido de humedad (%CH); de biomasa. Este valor indica la cantidad de agua que contiene la biomasa en relación a su peso seco. Es una medida importante para determinar el estado de la madera de forma húmeda o de forma seca, especialmente en procesos de construcción, carpintería, fabricación de muebles entre otros. Para llevar a cabo este análisis se aplica la ecuación número 1, el cual se determina la humedad de dicho análisis como lo menciona (Correa-Méndez et al., 2014).

La fórmula común para calcular el %CH

$$\%CH = \frac{(P H - P S)}{P S} * 100 \quad (1)$$

Donde:

%CH= % de contenido de humedad

P H= Peso Húmedo (kg)

P S= Peso Seco (kg)

En la Figura 3.4 se muestra el equipo para la obtención del porcentaje de humedad en las muestras de biomasa.



Figura 3.4. Balanza para cálculo de porcentaje de humedad (imagen propia)

3.5. Determinación del poder calorífico superior

El poder calorífico de la biomasa es la cantidad de energía que se libera cuando se quema un determinado tipo de biomasa, y se mide en unidades de energía por masa (como MJ/kg o kcal/kg). Varía según el tipo de biomasa, su contenido de humedad y la densidad de sus componentes (véase Figura 3.5) (Carvajal-Jara et al., 2018).



Figura 3.5. Bomba Calorimétrica

Para calcular el poder calorífico se utiliza una bomba calorimetría, y el proceso para calcularlo sería, la preparación de la muestra, la combustión, la medición de calor y cálculo de la unidad sería MJ/kg.

Existen dos tipos principales de poder calorífico:

- 1 Poder Calorífico superior (PCS): Es la cantidad total de energía liberada por la biomasa cuando se quema por completo, incluyendo el calor que se recupera al condensar el vapor de agua formado durante la combustión.
- 2 Poder calorífico inferior (PCI): Es similar al PCS, pero no incluye el calor contenido en el vapor de agua que generalmente se pierde. El PCI es más relevante en aplicaciones prácticas.

El poder calorífico de la biomasa varía considerablemente dependiendo del material.

-Madera seca: 15-20 MJ/kg

-Residuos agrícolas: 10-17 MJ/kg

-Pellets de madera: 16-20 MJ/kg

Cabe mencionar que el porcentaje del contenido de humedad es uno de los factores más importantes que afecta el poder calorífico de la biomasa, ya que la presencia de agua reduce la cantidad de energía disponible durante la combustión.

3.6. Determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinará mediante el procedimiento expuesto en la norma UNE-EN 14775 (2010). En este se calcina la muestra del biocombustible en aire bajo condiciones estrictamente controladas de tiempo y peso a una temperatura controlada de 550°C aproximadamente. Con ello se produce una pérdida de masa en la muestra a partir de la cual se contabiliza el contenido de cenizas. El procedimiento que se siguió para obtener los respectivos resultados se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Equipo para determinación de contenido de cenizas

El microanálisis de ceniza de biomasa es una técnica analítica utilizada para estudiar la composición química de las cenizas producidas al quemar biomasa, como residuos agrícolas, residuos forestales, cáscaras de frutas o desechos de plantas. Esta técnica permite identificar los elementos y compuestos presentes en la ceniza y es particularmente útil en el ámbito de la bioenergía, y el manejo de residuos (Ruiz et al., 2020)

Utilización de los microanálisis de cenizas de biomasa.

1.Optimización de procesos energéticos: Identificación de los elementos y compuestos presentes en la ceniza es crucial para mejorar la eficiencia y reducir los residuos en procesos de generación de energía a partir de biomasa, como son: orden: $O > Ca > K > Si > Mg > Al > Fe > P > Na > S > Mn > Ti$.

2.Estudios medioambientales y de contaminación: Detectar posibles contaminantes o elementos traza en las cenizas que, al dispersarse en el medioambiente, pueden afectar los suelos, cuerpos, cuerpos de agua o la atmósfera.

Para llevar a cabo el microanálisis de las cenizas de las muestras de residuos maderables, se utiliza un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) Varian (Modelo 730-ES; Varian Inc. (Agilent), Mulgrave, Australia) (Arcibar-Orozco et al., 2014); por este medio se busca la presencia de 29 elementos químicos y el análisis se realizó sólo una vez.

El microanálisis de ceniza de biomasa es una herramienta poderosa para entender y aprovechar el valor de la biomasa residual, contribuyendo a la sostenibilidad en sectores agrícolas, energéticos y ambientales.

3.7. Determinación del material volátil.

El material volátil de la biomasa es los componentes que se evaporan o que se descomponen en gases cuando la biomasa se calienta antes de la combustión completa, estos componentes incluyen una variedad de compuestos orgánicos hidrocarburos, ácidos orgánicos y otros compuestos volátiles.

Son los componentes liberados como gases o vapores cuando la biomasa se calienta, antes de que ocurra la combustión completa. Este material volátil incluye una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos:

- 1.Hidrocarburos: Compuestos formados por carbono e hidrógeno.
- 2.Compuestos oxigenados: Como ácidos, alcoholes, aldehídos y cetonas.
- 3.Compuestos de nitrógeno: Como amoníaco y cianuros
- 4.Gases inorgánicos: Como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), vapor de agua (H₂O) y otros gases menores.

La cantidad y composición de los materiales volátiles pueden variar según el tipo de biomasa y sus características específicas. Estos materiales juegan un papel importante en la combustión de la biomasa, ya que su liberación y posterior combustión contribuyen significativamente a la generación de energía y a la formación de productos de combustión.

Para la determinación de la cantidad de materias volátiles se realizará el siguiente procedimiento de acuerdo a la norma (UNE- 15148, 2010).

El contenido de materiales volátiles se calcula según la ecuación:

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

MV= Contenido de materiales volátiles en %

M₂= masa inicial de crisol + muestra, en g.

M₃= masa final del crisol + muestra, en g.

M= masa de la muestra en g.

El nivel de precisión en la terminación de los porcentajes de materiales volátiles no debe diferir uno de otro en más de 2%. Para esta prueba se utilizarán cinco muestras.

3.8. Determinación del carbono fijo

El carbono fijo en la biomasa se refiere a la cantidad de carbono que permanece en la biomasa después de que los componentes volátiles (como agua, gases y algunos compuestos orgánicos) se han eliminado durante procesos como la combustión o el pirólisis. Es una medida importante porque representa el contenido de carbono que, una vez quemado, produce energía en forma de calor y contribuye a la producción de carbón residual o ceniza. (Pérez-Vinent et al., 2022)

En términos de análisis, el carbono fijo se calcula indirectamente como la diferencia entre el 100% del peso de la biomasa y el contenido de humedad, materias volátiles y cenizas presentes en la muestra. Este valor se expresa como un porcentaje del peso seco de la biomasa y es un indicador clave del potencial energético de la biomasa, ya que está relacionado con la capacidad del material para liberar energía durante su conversión en combustibles sólidos, como el carbón vegetal o briquetas.

Después de eliminar la materia volátil. Lo que queda es el carbono fijo y las cenizas. El carbono fijo es lo que queda como combustible sólido (carbono resistente que no se volatiliza fácilmente). Este cálculo se realiza a través de la ecuación 3.

$$CF = 100 - CC - MV \quad (3)$$

Donde.

CF= Es el contenido de carbono fijo en base seca (%)

CC= Es el contenido de cenizas en base seca (%)

MV= Es el contenido de material volátil en base seca (%)

3.9. Análisis químico básico

Análisis químico para determinar celulosa: para determinar el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en una muestra de biomasa, implica varios métodos para aislar y cuantificar la celulosa, debido a su mezcla con otros componentes como los extraíbles, a continuación, se describe los pasos generales del método para determinar la celulosa:

1.-Preparación de la muestra:

- Secado: Es fundamental que la muestra esté seca, por lo que se coloca en una estufa a 105°C, para eliminar la humedad.
- Molienda: Tritura la muestra en partículas finas, para facilitar el acceso de los reactivos y asegurara la eficiencia en la extracción de la celulosa.

2.-Extracción de Sustancias no Celulósicas:

- Eliminación de extractivos: con solventes orgánicos como etanol y benceno, se remueven grasas, aceites resinas y otros componentes solubles en solventes. Esto asegura que análisis se centre en los polisacáridos de la pared celular.
- Extracción de hemicelulosa y lignina: para aislar la celulosa, se elimina la hemicelulosa con soluciones alcalinas, como hidróxido de sodio, y luego la lignina mediante el uso de ácidos (ácido sulfúrico diluido o clorhídrico). Estos pasos dejan una fracción que es predominantemente celulosa.
- Método para Cuantificar la Celulosa
- Los métodos más utilizados para cuantificar la celulosa son los siguientes:
- Método de Kurschner-Hoffer: Utiliza una mezcla de ácido nítrico y etanol para disolver la lignina y hemicelulosa, dejando una fracción sólida de celulosa que se puede pesar. (Utn - Rectorado, 2022)

Método de Clorito de Sodio: También conocido como el método de Wise, implica tratar la muestra con clorito de sodio en un medio ácido (ácido acético) para eliminar la lignina, dejando una fracción enriquecida en celulosa. (Césare et al., 2019)

Otra técnica para llevar a cabo el análisis de la composición química de los principales componentes poliméricos de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) para esta investigación, se determinarán mediante un análisis de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando α -amilasa (Goering HK, 1970). Para ello se tomarán 0.5 g de madera seca de tamaño de partícula homogénea (a través de una malla 60/40, 0.274/0.516 mm). Los análisis se realizaron tres veces para cada muestra, se utilizó un equipo ANKOM-200 (Muscule et al., 2016)

Los extraíbles en biomasa son compuestos químicos solubles en solventes específicos (agua, etanol, acetona, etc.) que pueden extraerse sin alterar significativamente la estructura de la biomasa. Estos compuestos son importantes en su influencia en los procesos de conversión de biomasa. Su composición química varía dependiendo de la fuente de biomasa, pero generalmente incluye sustancias extraíbles (Chávez-Sifontes & Domine, 2013).

3.10. Microanálisis de cenizas

El microanálisis de cenizas se utiliza comúnmente para identificar componentes inorgánicos presentes en materiales orgánicos como la biomasa, a continuación, se describe el proceso que se llevó a cabo para este tipo de análisis:

1. Preparación de las muestras: Seleccionar la muestra adecuada y asegurarse de que esté en su envase original y a temperatura de refrigeración. Si no tiene envase original, se debe enviar en un material apropiado no tóxico impermeable al agua y a las grasas.

2. Incineración: Calentar la muestra en un horno a una temperatura de 500°C a 600 °C durante 12-24 horas para la materia orgánica se queme completamente.
3. Disolución de cenizas: Después de calentar, dejar enfriar el crisol y trasladarlo a un desecador para evitar que absorba la humedad del ambiente.
4. Pesaje de las cenizas: Una vez enfriado completamente, pesar en la balanza la muestra en el crisol y la diferencia de masas entre el crisol y la muestra al final es igual a la masa de las cenizas.
5. Análisis químico instrumental.
6. Cálculos. El porcentaje de cenizas se calcula como la diferencia de masas entre el crisol y la muestra al final, expresado en porcentaje con base seca o humedad. Estos pasos son fundamentales para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados del microanálisis de cenizas, lo que es crucial para la toma de decisiones informadas en diversas aplicaciones industriales y científicas.

3.11. Análisis elemental

El análisis elemental permite determinar el contenido elemental de un combustible sólido, pero solamente aquellos que supondrán un aporte calorífico superior en las reacciones de combustión. Así, el análisis elemental incluye el porcentaje en peso de C, H, O, N, S, cenizas, humedad (pérdida de peso a 105 °C, para combustibles sólidos) y agua combinada (equivalencia de oxígeno). El contenido de nitrógeno y azufre tiene un impacto directo en los efectos derivados de la lluvia ácida (Fernández et al., 2017).

Las muestras que se emplearon para el análisis elemental fueron previamente preparadas a partir de un proceso de secado de estufa a 105 ± 2 °C durante 24 horas, para eliminar la humedad de la superficie y, así, garantizar la representatividad de los resultados (véase 3.7). Después de ello, las muestras obtenidas y secadas fueron pulverizadas y tamizadas a un tamaño de partícula menor de 250 μm , para garantizar una homogeneidad adecuada para su análisis.

La determinación de los elementos carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) se realizó mediante un analizador elemental de combustión (Analizador CHNS/O: Elemental Vario EL Cube), siguiendo las normas establecidas por la ASTM D5373 para C, H, N y S. Las mediciones se llevaron a cabo en atmósfera controlada de oxígeno, utilizando helio como gas portador, y los resultados se expresaron en porcentaje en base seca.



Figura 3.7. Analizador CHNS/O: Elementar Vario EL Cube

<http://www.cciqs.unam.mx/images/laboratorios/analisis-elemental-combustion2015.jpg>

El contenido de oxígeno (O) no se encontró de forma directa, sino que se determinó por diferencias; a partir de la cifra de 100 % se le restó el porcentaje de carbono, el porcentaje de hidrógeno, el porcentaje de nitrógeno, el porcentaje de azufre y el porcentaje de cenizas, mediante la siguiente expresión:

$$O(\%) = 100 - (C+H+N+S+Cenizas) \quad (4)$$

Este método indirecto es ampliamente aceptado en análisis elemental, ya que permite obtener una estimación confiable del oxígeno cuando no se dispone de una determinación instrumental directa.

Etapas 3 Sensibilización sobre aprovechamiento de residuos de biomasa.

3.12. Charla de sensibilización sobre aprovechamiento de residuos de biomasa con alumnado del COBAEM.

Procedimiento para la realización de la charla de sensibilización, duración de 45-60min:

1.- Objetivo: Que el alumnado comprenda la importancia del aprovechamiento de los residuos de biomasa, generados en el COBAEM.

2.- Desarrollo:

- 1.-Situación actual del medio ambiente (dependencia de combustible fósiles)
- 2.-La importancia del cuidado del medio ambiente y el aprovechamiento de residuos Biomásicos, en combustibles sólidos.

- 3.-En que afecta no cuidar el medio ambiente.
 - 4.-Responsabilidad de nosotros como individuos sociales, en la reducción de los impactos ambientales
 - 5.-Que pasa si no se toman acciones en el cuidado del medio ambiente.
 - 6.-Participación de los estudiantes en las reflexiones de la charla.
 - 7.-Compromisos y resumen breve de la charla.
-
- 3.- Conclusiones de la charla de sensibilización de aprovechamiento de residuos de biomasa, en biocombustibles sólidos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS

RESULTADOS

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**4.1. Identificación de residuos de biomasa**

Como parte del diagnóstico inicial, se realizó un levantamiento especial del Colegio de Bachilleres del Estado de Michoacán (COBAEM) Plantel San Francisco Pichátaro, con el fin de identificar las áreas construidas y los espacios naturales que potencialmente generan residuos de biomasa aprovechables energéticamente. Los datos obtenidos se sistematizaron en la Tabla 4.1, donde se detalla la distribución y superficie de cada uno de los espacios funcionales del plantel.

Tabla 4.1. Distribución de las áreas del COBAEM San Francisco Pichátaro

Construcción	Cantidad	Área m²	Total
Aulas	6	36	216
Cancha de Basquetbol	1	608	608
Laboratorios	2	48	96
Plaza Cívica	1	950	950
Biblioteca	1	9	9
Cooperativa	1	18	18
Baños	1	9	9
Baños	1	36	36
Cancha de Fútbol 7	1	600	600
Total			2,542
Área del Plantel			12122.72
Áreas verdes de biomasa			9580.72

En total, el plantel cuenta con una superficie de 12, 122.72 m², de los cuales 2,542 m² corresponden a áreas construidas y superficies deportivas, mientras que 9,580.72 m² se identificaron como áreas verdes con potencial para la generación de residuos de biomasa. Las construcciones están distribuidas en aulas, laboratorios, biblioteca, cooperativas, baños, canchas deportivas y plaza cívica. Destaca la presencia de espacios amplios como la plaza cívica (950 m²) y la cancha de fútbol (600 m²).

La identificación de residuos biomásicos se realizó con base en reconocimiento de campo dentro de las áreas verdes. En la Tabla 4.2 se resumen los principales tipos de biomasa observados y su procedencia.

Tabla 4.2. Recursos biomásicos

Procedencia	Recurso biomásicos
Pino	Ramas
	Huínomo

Cerezo	Ramas
	Hojas
Pasto	Silvestre

En la Tabla 4.2. Se identificaron especies como pino, huinumo, cerezo rama y cerezo hoja, de las cuales se recolectan residuos, así como la presencia significativa de pasto silvestre, el cual también puede ser aprovechado como materia prima para la producción de biocombustibles sólidos.

Estos resultados preliminares permiten establecer la viabilidad del aprovechamiento energético de los residuos vegetales generados dentro del plantel, y constituyen una base firme para el diseño de estrategias de valorización de biomasa con fines sustentables energéticamente.

Con información de estudios de desprendimientos de biomasa de las especies determinadas y con el área para ello, se establecieron las siguientes estimaciones de biomasa disponible para la producción de biocombustibles sólidos, de residuos biomásicos, en el Colegio de Bachilleres plantel San Francisco Pichátaro expresados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Estimación de residuos de biomasa

Tipo de Biomasa	Cantidad en kg semanal	Cantidad en kg Mensual	Cantidad en kg Anual
Ramas de Pino (RP)	1.4	9.7	116.54
Huinumo (H)	5	20	240
Ramas Cerezo (RC)	0.04	0.16	1.92
Hojas Cerezo (HC)	1.3	5.38	64.61
Pasto (P)	48	192	2304
Totales	55.74	227.24	2726.77

Para esta Tabla 4.3 se consideraron 50 pinos, para ramas y huinumo, 9000m² de pasto y 10 cerezos también con sus ramas y hojas.

En la Tabla 4.3, se hace la estimación de la cantidad de biomasa, en base a la generación y desprendimientos de las fuentes de biomasa seleccionadas, se estima que semanalmente tendríamos 55.74 kg de biomasa disponibles, mensualmente 227.24 kg de biomasa y anualmente de 2726.77kg, de biomasa.

4.1.1. Recolección de residuos

Se recolectaron, ramas de pino, ramas de cerezos, hojas de pino, hojas de cerezo y pasto (véase Figura 4.1) para la realización de los análisis correspondientes y posteriormente la realización de briquetas con las mezclas adecuadas para obtener un mejor rendimiento en cuanto poder calorífico y eficiencia, de las briquetas.

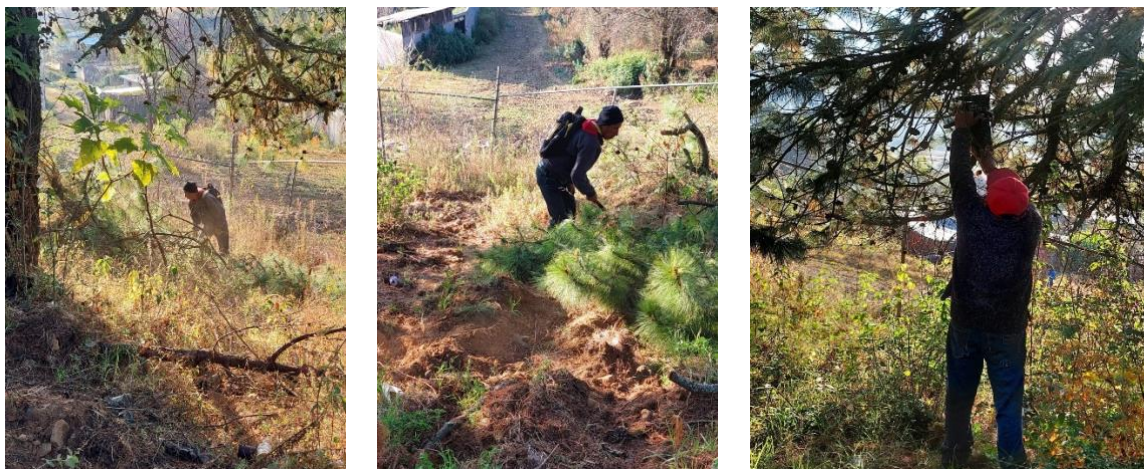
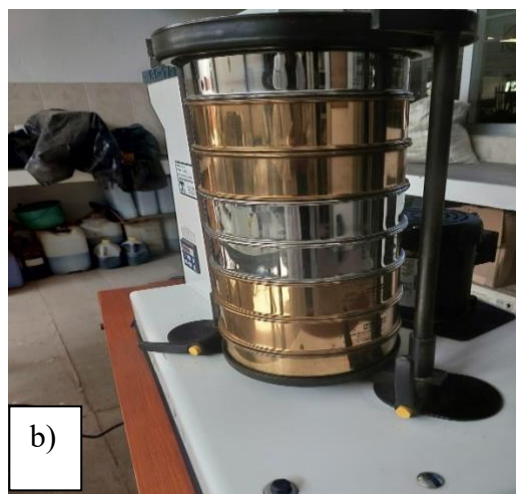


Figura 4.1. Recolección

Se recolecta ramas, hojas y material biomásicos, para la elaboración de las briquetas. Para aprovechamiento de los residuos.

4.1.2. Acondicionamiento de muestras

Las muestras fueron acondicionadas para las distintas pruebas que se le realizaron para caracterizar, la caracterización físico-químico y energética como se muestra en la Figura 4.2.



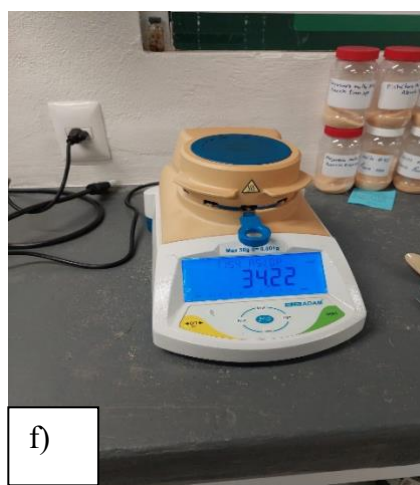
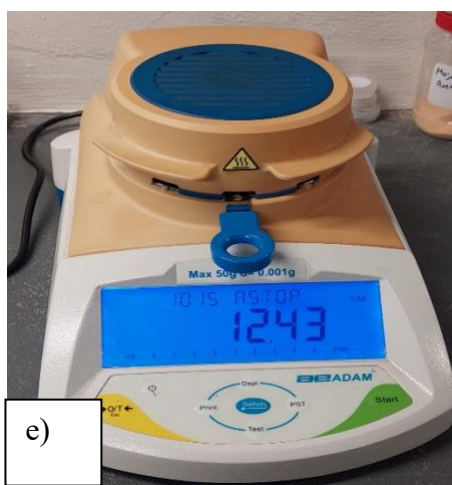


Figura 4.2. Muestra la preparación de las muestras, a) la molienda, b) el tamizado c) frascos con muestras de malla 40, d) muestras para análisis químicos básicos, e) pruebas de %CH, de residuos secos y f) pruebas de %CH de muestras frescas.

4.2 Caracterización Físico-Químico y Energética.

4.2.1. Determinación del contenido de humedad (%CH)

Los resultados de humedad de las cinco muestras con tres repeticiones de cada muestra se expresan en la Tabla 4.4, para este cálculo se utilizaron códigos de identificación de las muestras los cuales se describen a continuación:

HC1, HC2 y HC3, son los utilizados para las hojas de cerezo, de las cuales se realizaron tres muestras para tener un dato más aproximado del porcentaje (%) de humedad, RP1, RP2 y RP3, es la nomenclatura referida a las ramas de pino de las cuales se realizaron igual tres muestras, el siguiente código RC1, RC2 y RC3, es referido a las tres muestras de ramas de cerezo, P1, P2 y P3, es la nomenclatura referida al Pasto, que también se realizaron tres muestras, H1, H2 y H3, es las referidas al huinumo o a la hoja del pino, esta nomenclatura se utilizó para realizar estas pruebas de porcentaje de humedad.

Tabla 1.4. Determinación del contenido de humedad (%CH)

Muestra	%CH	Promedio	SD
---------	-----	----------	----

HC1	10.78	9.39%	1.23
HC2	8.98		
HC3	8.42		
RP1	11.95	11.64%	0.54
RP2	11.96		
RP3	11.01		
RC1	9.66	9.71%	0.23
RC2	9.51		
RC3	9.97		
P1	9.96	9.87%	0.19
P2	10.00		
P3	9.65		
H1	9.70	9.84%	0.61
H2	9.31		
H3	10.51		

Los valores promedios de las variables obtenidas demuestran que las ramas de pino (RP) fueron las que presentaron mayor contenido de humedad (11.64 %), seguidas por el huinumo (H) (9.84 %), el pasto (P) (9.87 %), las ramas de cerezo (RC) (9.71 %) y las hojas de cerezo (HC) (9.39 %), que fue el material que proporcionó el menor contenido de humedad.

En general, las muestras analizadas presentaron valores de humedad relativamente bajos, lo cual resulta ventajoso para la obtención de energía a partir de ellas, ya que el contenido de humedad en términos absolutos, debido a su relatividad, casa el poder calorífico y restringe la combustión. Del mismo modo, que las ramas de pino sean las que hayan proporcionado el mayor contenido de humedad se puede deber a su estructura anatómica y a la densidad y cantidad de resina que poseen.

En contraposición a las ramas de pino, las hojas de cerezo (HC) debido a su delgadez y menor capacidad de retención presentó los porcentajes más bajos. Estos resultados permiten concluir que, pese a que existe variabilidad entre los diferentes tipos de biomasa, se determina que todos se encuentran de manera general en valores adecuados para el pretratamiento y posterior aprovechamiento energético, por ejemplo, para la obtención de biocombustibles sólidos. La homogeneidad o consistencia de los valores de desviación estándar (SD) esperada es otra de las evidencias que refuerza la fiabilidad de los datos obtenidos en las repeticiones.

4.2.2. Poder calorífico superior

Los valores de Poder Calorífico Superior (PCS) obtenidos para las distintas muestras de residuos de biomasa analizadas se presentan en la Tabla 4.5 junto con sus respectivos promedios, unidades y desviación estándar (SD). Se empleó ácido benzoico estándar como referencia, presentando un PCS determinado de 26.45 MJ/kg con una desviación estándar de

0.04, esto último permite considerar que existe una correcta precisión en el equipo y el procedimiento experimental en estudio.

Tabla 4.5. Poder Calorífico Superior

Muestra	PCS	Promedio	Unidades	SD
Acido Benzoico estándar	26.45	-	MJ/kg	0.04
H1	20.73	20.73	MJ/kg	0.02
H2	20.71			
H3	20.76			
RC1	19.17	19.11	MJ/kg	0.06
RC2	19.05			
RC3	19.09			
P1	17.27	17.28	MJ/kg	0.06
P2	17.28			
P3	17.38			
HC1	20.75	20.66	MJ/kg	0.09
HC2	20.56			
HC3	20.67			
RP1	19.47	19.53	MJ/kg	0.10
RP2	19.58			
RP3	19.67			

Los residuos de biomasa analizados presentaron diferencias en su contenido energético. El conjunto de muestras H (H1, H2 y H3) obtuvo un PCS medio de 20.73 MJ/kg, con una baja dispersión de los datos ($SD = 0.02$), indicando una composición de las muestras que podría considerarse relativamente homogénea. En la evaluación de los residuos RC (RC1, RC2 y RC3), el promedio en el PCS fue menor: 19.11 MJ/kg, además de la dispersión de los datos que es algo más elevada ($SD = 0.06$).

El grupo de muestras P (P1, P2 y P3), registró el valor promedio más bajo de todos los residuos estudiados: 17.28 MJ/kg, indicando que estos residuos podrían tener menor potencial energético. Las muestras HC, alcanzaron un valor medio en el PCS de 20.66 MJ/kg, aunque con una mayor dispersión ($SD = 0.09$), lo que muestra cierta heterogeneidad en su composición. Las muestras RP (RP1, RP2 y RP3) presentaron valores medios en el PCS de 19.53 MJ/kg, además su desviación estándar fue de 0.10, indicando una variabilidad mayor que en otros grupos de muestra.

A partir del análisis de los resultados se pueden comenzar a determinar diferencias importantes en el poder energético de los residuos de biomasa que fueron analizados. En toda comparación y contrastación de residuos, los residuos H y HC presentaron los valores más altos de PCS (20.7 MJ/kg) colocándolos como los residuos que tienen un mayor potencial

para su aprovechamiento energético ya que sus valores se asemejan a las biomásas leñosas que emergen en la literatura comparativa.

Por otro lado, las muestras P presentaron el menor poder calorífico (17.28 MJ/kg), lo que puede explicar estar en razón a la residual humedad, contenido de compuestos minerales o menor contenido en carbono fijo, todos ellos factores que contribuyen a una disminución en el valor energético. Las muestras RC y RP se encuentran en valores intermedios de valor calorífico (19.11 MJ/kg para RC y 19.53 MJ/kg para RP) siendo estos valores intermedios un rango más que aceptable para su uso como biocombustibles, aunque con un menor rendimiento en relación a los residuos H y HC.

Por su parte, el rango de variación que se obtiene entre las muestras utilizadas en los experimentos analizados pone de manifiesto la variación que existe en función de la composición química, la densidad y el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de cada uno de los residuos de biomasa analizados. Del mismo modo, estos resultados ponen de manifiesto que no todos los residuos de biomasa tienen el mismo potencial energético, por lo que la elección de los materiales que se van a utilizar dentro de los procesos de bioenergía es necesario considerar su PCS, así como otros factores como la disponibilidad, el coste de su recogida o la facilidad del acondicionamiento.

4.2.3. Determinación de contenido de cenizas

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados del análisis del contenido de cenizas de las diferentes muestras de residuos de biomasa que se han identificado. Los contenidos de cenizas presentan un rango de 0.0142 g a 0.0754 g, en función del tipo de residuo y la réplica analizada.

Las muestras de (HC) presentaron un contenido de cenizas también muy constante entre 0.0517 g y 0.0555 g. Las muestras de (RP) mostraron los valores más bajos de cenizas, con intervalos que oscilan entre 0.0142 g a 0.0146 g, lo que indica que son los residuos que menos contenido en materia inorgánica presentan. Las muestras de (RC) tuvieron unos valores de contenido de cenizas que oscilaron entre 0.0371 g a 0.0399 g, teniendo un contenido de cenizas intermedio al de las otras muestras. Finalmente, las (P) mostraron los valores más altos de cenizas (0.0732 g a 0.0754 g) y los (H), los valores más bajos (0.0305 g a 0.0319 g).

Tabla 4.6. Determinación de contenido de ceniza.

Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Húmedo (g)	% Humedad	Crisol + Cenizas (g)	Ceniza (g)	Ceniza (%)
HC1	32.83	1.08	10.78	32.89	0.05	4.62
HC2	33.31	1.03	8.98	33.36	0.05	4.85
HC3	32.63	1.00	8.42	32.68	0.05	5.00
RP1	25.54	1.03	11.95	25.56	0.01	0.97
RP2	32.43	1.07	11.96	32.45	0.01	0.93

RP3	25.56	1.02	11.01	25.57	0.01	0.98
RC1	31.67	1.08	9.66	31.71	0.03	2.77
RC2	32.04	1.01	9.51	32.07	0.03	2.97
RC3	23.25	1.04	9.97	23.29	0.03	2.88
P1	17.35	1.03	9.96	17.42	0.07	6.79
P2	29.49	1.02	10.00	29.56	0.07	6.86
P3	31.05	1.02	9.65	31.13	0.07	6.86
H1	31.67	1.02	9.70	31.70	0.03	2.94
H2	32.04	1.01	9.31	32.07	0.03	2.97
H3	23.25	1.00	10.51	23.28	0.03	3.00

El análisis de las cenizas muestra las diferencias significativas que existen entre los diferentes tipos de biomasa, diferencias que están condicionadas por la naturaleza de la misma y la composición que presenta en su fracción inorgánica. Las muestras de (RP), que presentan el menor porcentaje de cenizas, pueden ser consideradas lo más óptimo para la producción de biocombustibles sólidos puesto que, habiendo una menor proporción de material mineral existente, permite obtener mejores resultados en la combustión y generar menos residuos no combustibles.

Sin embargo, las muestras de (P) mostraron tener el mayor porcentaje de cenizas, esto significa que, a pesar de que pueden producir un importante potencial energético, su uso se traduce en mayores volúmenes residuales de cenizas inorgánicas después de su combustión, lo que origina una disminución en la eficiencia del proceso y un aumento en el coste de limpieza y manipulación de las cenizas. El contenido de cenizas en (HC) y la (RC) se encuentran en la porción del contenido intermedio, que no presenta la acumulación de los niveles más bajos, pero sí mantiene una buena relación entre la fracción que se origina de las componentes orgánicas respecto la fracción que se origina de componentes inorgánicos. La (H), por su parte presentó un contenido moderado, como el de la corteza, indicando una composición heterogénea, con un proceso natural relacionado con la degradación y la acumulación de compuestos minerales en el suelo.

De esta forma se puede concluir que el contenido de cenizas es uno de los parámetros más delicados a la hora de seleccionar el residuo de biomasa que más adecuado para la obtención de biocombustibles sólidos, siendo las muestras de poda las muestras más esperanzadoras para su obtención por ser las que contienen menos material inorgánico.

4.2.4. Determinación de material volátil

Los valores de contenido de material volátil obtenidos para las muestras de residuos de biomasa analizadas se presentan en la Tabla 4.7. Los resultados muestran un rango de variación entre 76.20 % y 83.03 %, lo que indica un comportamiento relativamente

homogéneo en la mayoría de las muestras con diferencias atribuibles a la tipología de biomasa.

Tabla 4.7. Determinación de Contenido de Material Volátil.

Muestra	Material Volátil (%)
HC1	80.67
HC2	79.88
HC3	79.09
RP1	81.95
RP2	83.03
RP3	82.38
RC1	81.67
RC2	79.89
RC3	81.98
P1	76.94
P2	79.00
P3	78.80
H1	78.79
H2	77.69
H3	76.20

Las muestras de (RP) mostraron valores más altos de material volátil, alcanzando hasta un 83.03% de RP2, aspecto que hace suponer una mayor facilidad de descomposición térmica y, por tanto, un mejor potencial para la liberación de gases combustibles en el proceso de combustión. Por su parte, las muestras de (H) presentaron los valores más bajos, con un mínimo de 76.20% en H3, con lo que esto pone de manifiesto un bajo contenido de compuestos volátiles y, debido a esto, un comportamiento más lento en la fase de combustión inicial.

Las muestras de (RC) y (HC) presentaron valores intermedios, con valores medios próximos al 80%, comprendidos en un rango aceptable para el uso en el ámbito energético, aunque con un menor rendimiento en la combustión en relación al residuo de pino.

En términos generales, los resultados pusieron de manifiesto que todas las biomásas evaluadas poseen un contenido de material volátil superior al 75 %, lo que es típico de las biomásas lignocelulósicas y representa una ventaja para su uso como biocombustibles sólidos, dado que el contenido volátil está ligado directamente con la capacidad de ignición y facilidad de combustión, de ahí que los residuos de pino se denominan como los más apropiados en los procesos de obtención de energía, mientras que el resto de biomásas mantiene un potencial energético aceptable dentro del marco de los estándares reportados en la literatura.

4.2.5. Determinación del carbono fijo

La determinación del contenido de carbono fijo en las diferentes muestras analizadas se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Determinación de Carbono Fijo

Muestra	Carbono Fijo (%)
HC1	19.32
HC2	20.11
HC3	20.90
RP1	18.04
RP2	16.96
RP3	17.61
RC1	18.32
RC2	20.10
RC3	18.01
P1	23.05
P2	20.99
P3	21.19
H1	21.20
H2	22.30
H3	23.79

Los resultados observados ponen de manifiesto variaciones evidentes entre las distintas condiciones de tratamiento. En términos generales, hubo variaciones de los porcentajes de carbono fijo entre 16.96 % hasta 23.79 % para las distintas muestras, lo que refleja diferencias que pueden atribuirse a la propia naturaleza de cada muestra los diferentes tratamientos de las muestras para su obtención.

Así para las muestras de la serie HC los porcentajes de carbono fijo se estuvieron comprendidos entre 19.32 % y 20.90 %, con un promedio alrededor del 20 %; lo que indica que, en general, los valores presentan una composición explicativa adecuada. Las muestras RP mostraron los menores contenidos en carbono fijo, entre 16.96 % y 18.04 %, indicando que en términos generales ese contenido de carbono se presenta en menor concentración en el material carbonáceo estable. Por el contrario, las muestras RC presentaron una dispersión moderada de los valores de entre 18.01 % y 20.10 %, que evidentemente representa una composición intermedia.

Las muestras P los contenidos fueron uno de los más altos en términos de carbono fijo, destacando la muestra P1 con valores de 23.05 % en términos de contenido de carbono fijo,

para las muestras H se observaron los mayores contenidos de entre todos los contenidos de carbono observado en la serie, especialmente destacando la muestra H3 con los mayores valores de 23.79 %. Todo esto sugiere que las condiciones de preparación de las muestras P y H han favorecido el contenido de carbono fijo y que esto puede estar relacionado con una solución más estable en el tiempo y que se pueda ver facilitada frente a un alto grado de carbonización.

Concretamente, el incremento de carbono fijo en las muestras P y H es un aspecto favorable para aquellas aplicaciones en donde se requiere una mayor resistencia a la degradación térmica, en tanto que el bajo contenido en carbono fijo de las muestras RP evidencia un menor contenido de carbono retenido en forma de carbono estable.

4.2.6. Análisis químico básico

Los resultados procedentes del análisis químico básico de las muestras de residuos biomásicos se encuentran expuestos en la Tabla 4.9. En el presente análisis químico básico se realizó la determinación de extractivos, hemicelulosas, celulosa, lignina y contenido de cenizas a 525 °C, lo que resulta fundamental para conocer la composición estructural y la calidad energética de todos los materiales que se evaluaron.

Tabla 4.9. Análisis químico básico

Muestra	Extraíbles (%)	Hemicelulosas (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Cenizas (525°C)
P	35.25	35.37	24.54	3.72	1.12
RP	32.03	14.11	29.40	24.03	0.42
RC	35.88	15.60	32.06	16.02	0.44
HC	53.20	12.10	15.11	19.04	0.55
H	49.47	13.22	18.94	17.90	0.48

En lo que respecta al contenido de extractivos, las muestras mostraron una variación bastante considerable, con valores que fueron de 32.03 % (RP) hasta alcanzar el mayor porcentaje con un 53.20 % para la muestra HC, que fue la que más alto contenido presentó. Un elevado contenido de extractivos se encuentra asociado a la existencia de compuestos solubles, tanto en disolventes polares como no polares, (grasas, ceras, resinas, etcétera), lo cual tiene influencia directa en el comportamiento termoquímico de la biomasa, y que puede favorecer procesos de combustión y de gasificación mediante un aumento de la fracción volátil.

En lo que respecta a las hemicelulosas, los mayores valores observados fueron para la muestra P (35.37 %), y el menor valor fue para HC (12.10 %), suponiendo que este componente es fácilmente degradable térmicamente y, por lo tanto, ejerce una influencia importante en el proceso de liberación de volátiles durante la combustión, y por tanto, sobre la eficiencia energética de los residuos. El contenido de celulosa varió entre 15.11 % (HC) y 32.06 % (RC). Este biopolímero forma parte de las fracciones más importantes para la

producción de energía al descomponerse y liberar compuestos que intervienen de manera importante en la capacidad calorífica de la biomasa. Las muestras RC y RP presentaron los mayores contenidos de celulosa, lo que derivó en un mejor comportamiento energético que las demás.

Respecto a la lignina, las cantidades medidas oscilaron entre 3.72 % para la muestra P y 24.03 % para RP. Este artículo presenta un característico contenido en lignina que otorga rigidez estructural a la biomasa y que, además, se degrada más lentamente en procesos termoquímicos, lo que implica un buen rendimiento energético y una producción de sólido carbonoso en el proceso de combustión. Así, RP y HC destacan por sus altos valores de lignina lo que podría ser ventajoso para su uso en aplicaciones industriales que requieren materias residuales con una mayor densidad energética y resistencia a la degradación térmica.

Finalmente, los absolutos de cenizas mostraron valores relativamente bajos en todas las muestras analizadas, entre el 0.42 % (RP) y el 1.12 % (P). Un bajo contenido cenizas es deseable a la hora de generar energía térmica, ya que reduce la formación de depósitos, las escorias y los problemas operativos de los equipos de combustión o de gasificación. En este sentido, en el caso de las muestras de biomasa analizadas, todas presentaron características adecuadas para un aprovechamiento energético, destacando RP y RC por sus menores contenidos cenizas.

En definitiva, se puso de manifiesto que cada residuo biomasa presenta particularidades composicionales que determinan su comportamiento. Muestras como RP o RC destacan por su mayor contenido en celulosa y lignina con un bajo contenido cenizas que las hacen más adecuadas para la producción de bioenergía, mientras que otras muestras como HC y H presentan un elevado porcentaje de extractivos que también pueden ser útiles para su aprovechamiento en procesos termoquímicos. Por lo tanto, la elección del tipo de residuo biomasa dependerá de la aplicación que se prevé hacer con éste y de las propuestas para el aprovechamiento energético que se han formulado.

4.2.7. Microanálisis de cenizas

Los resultados del microanálisis de cenizas relativo a las diferentes muestras de residuos de biomasa se presentan en la Tabla 4.10, donde se pueden observar diversos elementos mayoritarios y de traza, todos ellos expresados por partes por millón (ppm); los elementos mayoritarios que son más abundantes en las muestras son el calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg); los que presentan concentraciones más bajas son el sodio (Na), fósforo (P) y hierro (Fe); otros elementos como el aluminio (Al), bario (Ba), manganeso (Mn) y zinc (Zn) también están presentes en cantidades considerables; mientras que algunos metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb), cobalto (Co) y talio (Tl) están presentes en cantidades muy bajas o indetectables (ND).

Tabla 4.10. Microanálisis de ceniza

Elemento	Unidades	H	HC	RP	RC	P
Ag	Ppm	< 0.0125	ND	2.86	ND	2.40
Al	Ppm	11599.55	780.51	15402.40	3152.75	2956.29
As	Ppm	ND	ND	ND	ND	ND
B	Ppm	124.17	142.21	211.98	146.96	137.75
Ba	Ppm	102.00	221.84	354.18	477.94	263.96
Be	Ppm	ND	ND	ND	ND	ND
Ca	Ppm	114902.03	139958.00	185559.00	234890.22	220561.88
Cd	Ppm	ND	ND	< 0.05	ND	ND
Co	Ppm	ND	ND	< 0.05	ND	ND
Cr	Ppm	12.64	3.60	10.09	2.08	11.78
Cu	Ppm	49.38	100.02	157.63	125.65	111.61
Fe	Ppm	6773.19	1044.19	8760.40	2197.29	2040.82
K	Ppm	56306.42	193950.00	44154.00	63825.35	60390.72
Li	Ppm	47.01	20.47	87.93	24.26	42.51
Mg	Ppm	55147.07	43596.80	33442.85	35556.69	33040.22
Mn	Ppm	2404.12	394.91	2108.37	1058.16	517.70
Mo	Ppm	ND	ND	ND	ND	< 0.05
Na	Ppm	2873.52	1357.34	2270.86	1919.12	2075.29
Ni	Ppm	5.83	2.88	13.91	2.74	52.85
P	Ppm	11601.69	38669.80	10088.65	20852.79	19535.28
Pb	Ppm	ND	ND	ND	ND	14.00
Sb	Ppm	ND	ND	ND	ND	ND
Se	Ppm	ND	ND	ND	ND	ND
Si	Ppm	1696.34	838.14	1532.26	1832.79	1668.00
Sn	Ppm	149.81	65.08	43.62	52.53	84.18
Sr	Ppm	480.26	1091.17	918.19	2151.38	405.38
Tl	Ppm	ND	ND	ND	ND	ND
V	Ppm	12.64	< 0.05	20.04	< 0.05	8.90
Zn	Ppm	290.45	274.54	636.20	422.88	302.4

En general, se puede señalar que el calcio fue el componente que mostró valores más elevados en las muestras analizadas, con concentraciones incluso superiores a los 200,000 ppm en ciertos casos, lo que confirma su predominio en la composición mineral de las cenizas provenientes de la biomasa. El potasio mostró también valores altos, alcanzando concentraciones de hasta 193,950 ppm, lo cual es considerado típico de materiales lignocelulósicos e indica que este elemento puede ser intensificado por procesos de combustión que promueven la formación de compuestos de tipo alcalino. Al magnesio se le midieron unos valores en un rango muy amplio (33,442–55,147 ppm), lo que deja entrever la importancia del mismo como un constituyente de la fracción inorgánica de los residuos. Por lo que respecta a los elementos de transición, el hierro presentó concentraciones muy variables (1,044–8,760 ppm), mientras que para el manganeso se obtuvieron valores entre 394 y 2,404 ppm. La composición de las cenizas de estas biomásas indica que, a pesar de encontrarse presentes en menor proporción que las cenizas de tipo alcalinotérreo, ambos tienen un posible efecto en las propiedades reactivas y físicoquímicas de éstas.

En la misma línea, metales como el níquel, el cobre o el zinc aparecieron en proporciones bajas o medias, pero sin llegar a representar ninguna fracción significativa de la población

estudiada. Los metales que se consideran potencialmente tóxicos, como el arsénico, el cadmio, el plomo o el antimonio, fueron detectados en niveles nulos o mínimos; algo que se considera en el contexto ambiental como un aspecto positivo, porque se rebajan los riesgos asociados al uso energético de estas biomásas y la posterior eliminación de sus cenizas.

Como contrapartida, la baja cantidad de fósforo (con un registro de hasta 38.669 ppm) y niveles de sodio superiores a 2800 ppm podrían estar influyendo en la formación de escorias y corrosión en los procesos de combustión, este último aspecto puede ser relevante en términos técnicos para futuros procesos de aprovechamiento energético. En resumen, el microanálisis de las cenizas muestra que las biomásas analizadas tienen una estructura mineral formada por Ca, K y Mg, con proporciones menores de Fe, Na y P, junto a trazas de metales pesados; esta composición responde a la literatura referida a biomásas de origen agrícola y/o forestal y respalda su aprovechamiento como una fuente energética, y solo necesita las consideraciones del manejo de cenizas para evitar problemas de incrustaciones, corrosión o la disposición final.

4.2.8. Análisis elemental

El análisis elemental de las distintas muestras (Tabla 4.11) ha puesto de manifiesto diferencias muy claras en el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Tabla 4.11. Análisis elemental

Muestra	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Oxígeno (%)	Nitrógeno (%)	Azufre (%)
RP	48.29	5.86	45.46	0.37	nd
RC	45.81	5.89	46.84	1.45	nd
HC	47.55	6.36	42.49	3.58	nd
P	42.81	5.70	50.23	1.24	nd
H	49.79	6.03	43.50	0.67	nd

El contenido de carbono osciló entre 42.815 % (muestra P) y 49.792 % (muestra H), de modo que la muestra H presenta el mayor grado de carbonización y la muestra P el menor. Respecto al hidrógeno, los valores oscilan entre 5.703 % (P) y 6.389 % (HC), lo que indica ligeras variaciones en el contenido de compuestos volátiles o de grupos funcionales.

El oxígeno, la función analizada con un rango mayor, se sitúa entre el 50.234 % en la muestra P y el 42.496 % en la muestra HC, lo que se traduce en diferencias en la existencia de grupos oxigenados, posiblemente asociados al grado de oxidación o a la estructura de los precursores aplicados. En cuanto al nitrógeno, la muestra HC es la que presenta mayor contenido respecto a las demás (3.580 %), mientras que RP es aquella que contiene el menor (0.378 %), lo que denota variaciones en la incorporación de compuestos nitrogenados durante el proceso.

Destacar que en todas las muestras el azufre no fue detectable (nd), lo que se asocia a que no existe en cantidad o que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo utilizado.

Así, estos resultados no hacen más que evidenciar que las diferencias en la condición de las preparaciones o la naturaleza de las materias primas están ligadas a la composición elemental

y se conllevan, probablemente, variaciones en las propiedades fisicoquímicas, así como del comportamiento en siguientes aplicaciones de estos productos.

4.3. Charla sobre sensibilización sobre aprovechamiento de residuos de biomasa con alumnado del COBAEM.

La intervención pedagógica se realizó con un grupo de estudiantes en su totalidad de 152 alumnos, agrupados en grupos de 30 alumnos a lo largo de cinco días. En el transcurso de la misma, se llevó a cabo una presentación visual a través de 24 diapositivas (el contenido está detallado en el Anexo A). El objetivo de la intervención consistió en sensibilizar a los asistentes en el aprovechamiento de los residuos biomásicos.

En el marco de la actuación metodológica se realizó una dinámica de sensibilización previamente seguida de unas conclusiones. Estas actividades fueron planteadas con la intención de recoger los aprendizajes de los estudiantes y comprobar hasta qué punto asimilaban la información recibida, de forma que se pudiera garantizar la satisfacción de los objetivos propuestos en el presente proyecto.

CAPÍTULO 5
DISCUSIÓN DE LOS
RESULTADOS

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Identificación de residuos de biomasa

El levantamiento del COBAEM Plantel San Francisco Pichátaro dio la oportunidad para conocer la distribución de áreas construidas y áreas naturales, observándose que el 79 % de la superficie corresponde a áreas verdes que pueden generar la producción de biomasa, donde espacios extensos como la plaza cívica y la cancha de fútbol destacan por la cantidad de residuos vegetales que pueden ser aprovechados. Estos resultados obtienen coincidencias con lo que ha propuesto la documentación previa desarrollada en instituciones educativas por la que las proporciones áreas verdes afectan directamente la posibilidad de biomasa para fines energéticos. Las áreas que pueden ir siendo identificadas nos permiten poder estimar el volumen de residuos, por otro lado, se pueden dar prioridades aquellas áreas con rendimientos energéticos superiores.

De ahí que el diagnóstico final establece las bases para planificar las estrategias de gestión sostenible de los residuos de biomasa, promoviendo el aprovechamiento energético y disminuyendo los propios residuos en la institución educativa.(Chicaiza et al, 2023)

5.2. Contenido de humedad

El examen al contenido de humedad en las distintas biomásas estudiadas determinó diferencias muy significativas entre los tipos de residuos, confirmando así lo afirmado en la literatura, donde se manifiesta que la humedad es una de las cualidades más cambiantes de la biomasa(Ortiz García et al., 2020), (Bustamante García et al., 2017)

En este estudio, las ramas de pino (RP) mostraron el mayor contenido de humedad (11.64%); en contrapunto, las hojas del cerezo (HC) dieron el menor valor (9.39%). La diferencia evidente entre el valor más alto y el más bajo se puede explicar por la estructura anatómica y fisiológica de cada uno de los materiales, ya que las ramas de coníferas conservan mayor cantidad de agua debido a tener la presencia de canales resiníferos y mayor densidad de fibras, mientras que las hojas han desarrollado poca capacidad de almacenamiento hídrico.

Al comparar los valores obtenidos con los de estudios previos, se aprecia que el intervalo entre 9 y 12% que se presenta en este trabajo es comparable a los valores típicos reportados en biomásas lignocelulósicas secadas al aire (8-15%) (Suárez et al. 2022). Los residuos agrícolas como el pasto tienen un contenido de humedad de entre el 8% y el 12% y las ramas de los árboles que crecen en el entorno forestal entre el 10% y el 15%, dependiendo de las condiciones ambientales y de almacenamiento.

El resultado también puede considerarse de interés, ya que la humedad tiene un efecto en el poder calorífico y la eficiencia de combustión de la biomasa(Guillén & Dávila, 2014),Un

contenido de humedad elevado disminuye la eficiencia térmica, pues parte de la energía que se produce se destina a evaporar la disponible en la biomasa. De esta manera, el intervalo de secado de las muestras analizadas se considera adecuado para procesos de conversión energética, ya que se encuentra por debajo del límite de aprovechamiento (>20%).

Finalmente, la variabilidad observada en las muestras analizadas pone de manifiesto la necesidad de tener en cuenta la especificidad de cada tipo de residuo a la hora de determinar estrategias para su aprovechamiento bioenergético. Por ejemplo, el hecho de que las ramas de pino contengan un porcentaje elevado de humedad invita a considerar pretratamientos de deshidratación, mientras que residuos de las hojas de cerezo o el pasto son potencialmente más asimilables en procesos de briquetadora o combustión directa con menos requerimientos de acondicionamiento.

5.3. Discusión poder calorífico

Los valores de PCS alcanzados en este estudio se encuentran en la gama reportada para diferentes biomásas a nivel internacional. (Manrique, Javi, et al., 2019) estos valores alcanzan de 18-21 MJ/kg en maderas secas y entre 14–18 MJ/kg en los residuos agrícolas, debido a que estos últimos tienen mayor contenido en cenizas y compuestos volátiles.

En el caso de residuos lignocelulósicos, (Alvarado Flores & Rutiaga Quiñones, 2018) indicaron que sus valores eran comprendidos entre 18-20 MJ/kg, bastante coincidentes a los valores que se obtuvieron para las muestras RC y RP en este trabajo. Al mismo tiempo, (*Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*, 2018) apuntan a que la lignina es el compuesto que presenta el mayor aporte energético dentro de la biomasa ($\approx$ 25-26 MJ/kg), lo que explicaría que las muestras H y HC, con mayor proporción de este polímero alcancen valores próximos a los 21 MJ/kg.

Por el contrario, los residuos P, con su PCS de 17,28 MJ/kg, se encuentran en la parte inferior de los valores reportados, similares a los obtenidos en residuos herbáceos o agrícolas con menos contenido lignocelulósico, como las pajas o cáscaras que encajan con los resultados expuestos en la base de datos (Castanaro et al. 2008).

La comparación muestra que los residuos analizados en este trabajo presentan un potencial energético que es competitivo frente a biomásas (pellets y briquetas) comúnmente utilizadas en procesos de combustión o densificación. Esto confirma la posible viabilidad de su aprovechamiento, aunque también hay que indicar que si bien es cierto que el potencial de aprovechamiento es grande, la eficiencia real dependerá además de otras características como la densidad aparente, la humedad y la facilidad del procesamiento.

5.4. Contenido de cenizas

Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para distintos tipos de biomásas. De acuerdo con (Melissari, 2012) el contenido de

cenizas en maderas suele variar entre 0.3 % y 1.5 % en base seca, mientras que en residuos agrícolas puede superar el 5 %, debido a la acumulación de minerales en hojas y tallos.

En comparación, las muestras analizadas de poda (RP) presentaron los valores más bajos, equivalentes a los reportados para maderas de alta calidad energética, mientras que las muestras de pino (P) mostraron contenidos más elevados, acercándose a los valores típicos de residuos agrícolas con mayor fracción inorgánica. Estos resultados sugieren que, aunque todos los residuos estudiados son viables para uso energético, aquellos con menor proporción de cenizas, como los de poda, ofrecen ventajas operativas y ambientales frente a materiales con mayor contenido mineral.

5.5. Contenido de material volátil

Los valores obtenidos para el contenido de material volátil de las biomásas analizadas (76,20–83,03 %) encajan dentro del intervalo de valores consultados en la literatura científica para los residuos lignocelulósicos, que generalmente varía entre el 70 % y el 85 % (Pérez-Vinent et al., 2022). Esta conducta respalda que las biomásas características en cuestión pudiesen ser empleadas como biocombustibles sólidos, ya que un elevado contenido de volátiles facilita el encendido y permite una combustión más rápida respecto de aquellos con menor reactividad.

En concreto, el (RP) mostró los valores más altos (superiores al 82 %), siendo este punto en consonancia con lo apuntado por (Carvajal-Jara et al., 2018) quienes indican que las maderas blandas como el pino tienden a presentar mayor contenido de volátiles como consecuencia de su menor densidad y su mayor proporción de extractivos. Esta propiedad convierte a los residuos de pino en un material de alto potencial energético y buen comportamiento, bien durante la combustión directa o bien durante la gasificación.

En el extremo opuesto, las (H) son las que presentan los valores más bajos (76.20–78.79 %) que pueden relacionarse con su mayor grado de descomposición y fracciones minerales, como cita (Rodríguez et al. 2013) Este comportamiento conlleva una combustión más lenta y menos eficiente en comparación con maderas o cortezas, aunque no se debe descartar su viable uso como biocombustible, si bien debe complementarse con otros materiales de mayor reactividad.

Las muestras de (RC) y (HC) aportaron valores intermedios, que podrían resultar similares a los reportados por, (Manrique, Javi, et al., 2019) quienes indican que dicho tipo de materiales presenta una alta variabilidad dependiendo de la especie, condiciones de crecimiento o contenido de extractivos, por lo que su uso como biocombustible puede realizarse con otros residuos de mayor contenido volátil, de modo que se alcance el equilibrio en la calidad del combustible sólido.

En términos generales, que todas las biomásas que se han investigado superen el 75 % de material volátil se corresponde con los valores característicos de las biomásas lignocelulósicas que se encuentran en la literatura(Borja, 2018).Por lo que esto confirma la conveniencia de ser utilizados como insumos energéticos renovables, si bien las diferencias que se observan en el tipo de residuos sugieren que el pino se presenta como la biomasa más eficiente para su aplicación en combustión y conversión termoquímica, mientras que la hojarasca y corteza darían lugar a estrategias de aprovechamiento más específicas (mezclas o pretratamientos).

5.6. Discusión carbono fijo

Los contenidos de carbono fijo obtenidos en las diferentes muestras muestran un claro reflejo de las condiciones de preparación y de la naturaleza del material de partida. El intervalo 16.96 % y 23.79 % obtenido está de acuerdo con lo presentado en las referencias sobre aquellos materiales lignocelulósicos en los que la carbonización se ha llevado a cabo, debido a que la formación de carbono fijo está en relación directa con la desvolatilización y el grado de aromatización de la estructura carbonosa (García, 2012),(Cayancela-Muñoz et al., 2022)

Las máximas existencias de carbono fijo se obtuvieron para las muestras P y H, donde pudieron alcanzarse valores por encima del 21 %, lo que lleva a suponer una mayor estabilidad térmica y un mayor grado de carbonización. Dicha conducta podría ser producto de una mayor proporción de componentes estructurales resistentes, tal como el caso de la lignina, o de condiciones de tratamiento de los materiales que tienden a favorecer la condensación de los anillos aromáticos, aumentando así la fracción de carbono que no puede ser volatilizada ((Chávez-Sifontes & Domine, 2013)) De forma coincidente, diversos autores han señalado que los materiales que poseen un alto contenido en lignina tienden a generar carbones con un mayor porcentaje del carbono que permanece en el estado fijo, característica que suma a su potencial como utilizando para aplicaciones energéticas o como material adsorbente.(Maceda et al., 2021),(Chávez-Sifontes & Domine, 2013) Por el contrario, las muestras RP presentaron los valores más bajos de todas (16.96–18.04 %), lo que se interpreta como una menor retención de carbono en forma estable y una mayor proporción de compuestos volátiles. Este resultado indica que tanto la materia prima como las condiciones de tratamiento sobre este tipo de serie no permitirían proceder a una carbonización total, disminuyendo el potencial de desarrollar estructuras carbonosas condensadas (Melissari, 2012).

El comportamiento intermedio de las muestras HC y RC, que presentan valores en el entorno del 18–20 %, pone de manifiesto que, aunque se contempla un suficiente desarrollo en carbonización, las variaciones en el tipo de precursor o en otros parámetros del proceso (por ejemplo, temperatura, tiempo de residencia o atmósfera de reacción) limitarían la evolución de una matriz rica en carbono (Jiménez 2012).

Desde un punto de vista práctico, el elevado contenido de carbono fijo en las muestras P y H puede ser un valor añadido en contextos donde se busca una mayor densidad energética o mayor estabilidad a la degradación térmica, como en la obtención de biocombustibles sólidos o biochar para empleo agrícola (Torres, 2008) (Raffaelli, 2020). Por el contrario, las muestras RP, con reducciones significativas en el formato de muestras carbónicas, pueden descalificarse para aplicaciones que exigen carbones de alto rendimiento energético, aunque pueden ser interesantes en procesos donde se optimizan las reactividades o la liberación de volátiles, (Loreto et al., 2014).

Estos resultados invocan la necesidad de poder optimizar los parámetros de procesamiento para maximizar el contenido de carbono fijo y de este modo las propiedades funcionales del material resultado, tal y como recomiendan trabajos recientes en el área de valorización de biomasa. (Ferro et al., 2009), (Arnao & Lazo, 2024).

5.7. Discusión análisis químico básico

Las tendencias observadas en los resultados obtenidos en el análisis químico básico de las muestras de residuos de biomasa son coherentes con las documentadas en la literatura para los distintos tipos de materiales lignocelulósicos. El contenido de extractivos de las muestras HC (53.20 %) y H (49.47 %) es elevado si se consideran sus correspondientes valores típicos y los que se pueden encontrar para maderas, ya que estos valores suelen encontrarse en una horquilla de 5-20% (Fengel y Wegener, 2003; Rowell, 2012). Este alto contenido en compuestos solubles podría explicarse a partir de la naturaleza de los residuos analizados. Los materiales herbáceos y algunos residuos agrícolas parecen presentar fracciones considerables de aceites, resinas y compuestos fenólicos (Demirbaş, 2005). Éstos sugieren que los residuos analizados podrían liberar fracciones importantes de volátiles cuando se someten a procesos termoquímicos.

Los contenidos de hemicelulosas oscilaron entre 12.10% (HC) y 35.37% (P). Se observó, como indica la literatura especializada, que en lo referente a su contenido en madera blandas y duras este componente se encuentra entre 20-30 %, mientras que en residuos agrícolas parece variar entre 15-35 % (Sun et al., 2005; Sluiter et al., 2010). En este sentido, la muestra P se comporta en este sentido tal y como lo haría un material leñoso, mientras que las demás se acercan más a lo esperado en biomasa herbácea y agrícola donde el contenido de hemicelulosas, por otra parte, es menor debido a su fácil degradación.

Con respecto a su contenido de celulosa, los valores medidos (15.11-32.06 %) están dentro de lo esperado para materiales lignocelulósicos, que varían según las fuentes entre 30-50 % para maderas y 20-40 % para residuos agrícolas (Fengel y Wegener, 2003; Rowell, 2012). En el caso particular de las muestras RC (32.06 %) y RP (29.40 %), los valores se encuentran próximos a los descritos para las maderas duras, lo que indica un buen potencial energético, dado que la celulosa es un componente esencial en la producción de energía eléctrica a partir de la combustión y la pirólisis de los combustibles sólidos.

En lo que respecta al contenido de lignina, se observó una gran variabilidad, desde 3.72 % (P) hasta 24.03 % (RP). La lignina que se halla en maderas se suele tener en un rango de 20–30 %, mientras que en aquellos residuos agrícolas y herbáceos el intervalo de lignina se encuentra, por lo general, entre los 10–20 % (Demirbaş, 2005; Sluiter et al., 2010). En este sentido, la muestra RP presenta una determinada cantidad de lignina cercana a la de las maderas, lo que le confiere no solo una mayor estabilidad térmica, sino un mayor rendimiento en la obtención del carbón sólido. Con relación a lo anterior, la muestra P, con un contenido de lignina atípicamente bajo, se asemeja más a los materiales herbáceos que presentan un proceso de degradación rápida, hecho que puede restringir el contenido energético de la misma.

Por último, el contenido de cenizas de las muestras fue bajo, con valores de cenizas que van desde el 0.42 y el 1.12 %. La literatura menciona que las maderas suelen tener contenidos de cenizas inferiores al 2 %, mientras que los residuos agrícolas y herbáceos pueden ser superiores al 5 % (Vassilev et al., 2010). En esta línea, las biomásas evaluadas se encontraban en un intervalo apropiado para la aplicación de energías desde un punto de vista energético, lo que suponía una disminución del riesgo de que aparecieran incrustaciones, corrosión o escorias en los equipos de combustión.

En síntesis, los resultados obtenidos coinciden con lo que se describe en estudios previos y corroboran la viabilidad energética de los residuos analizados. Las muestras RP y RC se caracterizan por tener un contenido elevado en relación con el de celulosa y lignina en un entorno con contenidos bajos de cenizas, características similares a las de las maderas, por lo cual son adecuadas para bioenergía. Por su parte, HC y H, pese a tener bajo contenido de celulosa, tienen un alto contenido de extractivos que podrían propiciar otros procesos termoquímicos alternativos. Estas especificidades subrayan la importancia de la biomasa con respecto a la aplicación energética.

5.8. Discusión del microanálisis de cenizas

Los datos obtenidos del microanálisis de cenizas evidencian que el calcio (Ca) fue el elemento mayoritario en todas las muestras analizadas, obteniéndose concentraciones por encima de los 200 000 ppm, en consonancia con lo que mencionan (Melissari, 2012) y, los cuales argumentan que el calcio es uno de los elementos inorgánicos más importantes de cenizas obtenidas de biomásas agrícolas y forestales en las que puede incluso tener una concentración mayor del 15-25 % en peso. Su predominancia puede estar relacionada con la naturaleza lignocelulósica de los residuos y con la alta capacidad de movilidad que tiene el calcio en los tejidos vegetales, que lo hace imprescindible en el comportamiento térmico y reactividad de las cenizas. El potasio (K), con hasta 193,950 ppm, también tuvo una presencia significativa, ajustándose a los valores descritos en la literatura (Miles et al., 1996; Demirbas, 2005) donde se indican contenidos de K elevados en biomásas herbáceas y agrícolas debido a su alta solubilidad y movimiento en las plantas. Estos elevados niveles de potasio pueden

favorecer la formación de propiedades alcalinas de forma concomitante a la combustión, aumentando el riesgo a problemas técnicos como la sinterización o la aparición de depósitos en los sistemas de combustión, como advierten Niu et al. (2016).

En el caso del magnesio (Mg), los valores obtenidos (33,442–55,147 ppm) son similares a los rango de concentraciones descritos por (Cañizares-Villanueva, 2000) que reportan en su trabajo concentraciones de 1–5% en peso para los diferentes tipos de biomasas. El Mg, si bien en una menor proporción en comparación con el Ca y K, contribuye de forma relevante en la fracción alcalinotérrea de las cenizas y puede incidir en la fusión y reactividad de los compuestos inorgánicos.

Para los elementos de transición, se detectaron concentraciones variables de Fe (Fe: 1,044–8,760 ppm) y Mn (Mn: 394–2,404 ppm). Estos valores coinciden con lo indicado por Obernberger et al. (2006), quienes apuntan que la existencia de los mismos, si bien en proporciones menores a los de Ca y K, influencia en el color, en la formación de los óxidos estables y en la reactividad química de las cenizas, así como que su variabilidad puede relacionarse con o bien con la variabilidad edáfica, o bien con la condición de la que provengan las biomasas estudiadas. En lo que respecta a los metales traza como Ni, Cu y Zn, se hallaron niveles bajos a moderados lo cual concuerda con lo observado por Demirbas (2005); en cuanto a los elementos potencialmente tóxicos, como As, Cd, Pb y Sb, se detectaron concentraciones nulas o mínimas. Este dato es importante desde el punto de vista ambiental, ya que disminuye los riesgos que pueden derivarse del uso energético de las biomasas en comparación a otros residuos urbanos o industriales en donde los metales están mucho más presentes (Cañizares-Villanueva, 2000).

Por otro lado, se obtuvo un bajo contenido de fósforo (P), que alcanzó máximos de 38,669 ppm, inferior a lo que se ha reportado para residuos agrícolas con altas concentraciones de fósforo, como los granos o residuos de oleaginosas (Khan et al., 2009). Respecto a las concentraciones de sodio (Na), los contenidos superiores a 2,800 ppm son relativamente altos, pudiendo ser un factor limitante en cuanto a la aparición de problemas de corrosión y la generación de escorias en los equipos de combustión, tal como apuntan Werkelin et al. (2011).

En conjunto, la composición de cenizas obtenida, marcada por la presencia de Ca, K y Mg, con poca proporción de Fe, Na y P y trazas de metales pesados, corresponde a los perfiles incorrectamente referidos en la literatura para biomasas de origen agrícola y forestal (Melissari, 2012) (Rodríguez et al., 2013) Este patrón apoya la posibilidad del uso energético renovable de estas biomasas, pero siempre que se impongan medidas técnicas de manejo de cenizas para contrarrestar los riesgos de incrustaciones y sinterización y corrosión que pueden aparecer en los sistemas de combustión.

5.9. Discusión del análisis elemental

El análisis elemental presentado ha permitido establecer diferencias significativas en la composición química de las muestras, mostrando así la influencia de la materia prima y de las condiciones de preparación en su estructura final (Méndez-Zetina et al., 2017) En primer lugar, el contenido de carbono fue el parámetro más variable, con valores que variaron entre 42.815% (muestra P) hasta 49.792% (muestra H), donde el porcentaje más alto de la muestra H refleja una mayor condensación aromática y, por ende, un mayor nivel de carbonización, lo que le otorgaría a esta muestra, además, una mayor estabilidad térmica y menor presencia de compuestos oxigenados. La muestra P, con el menor contenido de carbono, podría tener una mayor presentando una mayor cantidad de grupos funcionales oxigenados, lo que le cabe un mayor polaridad superficial (Zamora, 2013).

El comportamiento del oxígeno, que presenta un máximo en la muestra P (50.234 %) y un mínimo en HC (42.496 %), defiende el anterior razonamiento. Un elevado oxígeno se relaciona con una alta proporción de grupos funcionales como hidroxilos, carbonilos y carboxilos que potencian la reactividad superficial y la preferencia por compuestos polares (Bertero, 2011); por lo que, la muestra P podría tener ventajas en caso de necesitarse interacciones químicas con moléculas hidrofílicas, mientras que la muestra HC, que presenta menos oxígeno, podría ser favorable para tener interacciones con compuestos no polares o tener unas buenas condiciones de estabilidad hidrofóbico (Müller et al., 2013.).

De otro lado, el hidrógeno tuvo cambios modestos (5.703–6.369 %), lo que sugiere pequeñas diferencias en la abundancia de compuestos volátiles o grupos orgánicos. A pesar de ser un elemento menos determinante que el carbono y el oxígeno, este elemento puede afectar, de forma determinante, la densidad de los grupos superficiales y la estabilidad térmica del material. El nitrógeno presentó la mayor dispersión relativa desde 0.378 % en RP a 3.580 % en HC, siendo un elemento importante por el hecho de que la existencia de los grupos nitrogenados puede proporcionar propiedades ácido-base y mejorar la conductividad, conduciendo a aplicaciones en catálisis o almacenamiento energético o procesos de adsorción específicos (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo et al., 2004).

El elevado contenido de este elemento en HC sugiere una síntesis que favoreció su retención, que podría, de este modo, otorgar ventajas frente al resto de las muestras (Cárdenas-Navarro, et al., 2004). En último lugar y en lo que respecta al azufre, la ausencia de este elemento en todas las muestras (nd) es positiva desde una perspectiva ambiental ya que, por un lado, minimiza el riesgo de la obtención de emisiones contaminantes y, por el otro, aporta estabilidad química al material (Méndez-Zetina et al., 2023). En general, de este modo, los resultados obtenidos muestran que las variaciones en los contenidos de C, O y N no solo evidencian diferencias en la materia prima y en el proceso de síntesis, sino que también son determinantes de las propiedades fisicoquímicas de los materiales, relación determinante para poder prever su comportamiento en aplicaciones específicas (adsorción de

contaminantes, catálisis, almacenamiento energético, etc.) y, además, permite el ajuste de las condiciones de preparación hacia el establecimiento del óptimo de las características deseadas (Bustamante García et al., 2017).

5.10. Discusión de la sensibilización en estudiantes del COBAEM

La ejecución de la intervención educativa nos presentó resultados positivas referidas a la aceptación y comprensión teórica sobre el aprovechamiento de los residuos biomásicos.

La elección metodológica de dividir la totalidad del alumnado de 152 personas en grupos formados por reducidas cantidades de hasta 30 personas a lo largo de cinco días fue para nosotros una estrategia altamente eficaz. La planificación logística de la acción generó un marco en el que se pueda evitar la dispersión de la atención en audiencias masivas y permite crear un marco general para la conversación, la interacción y la focalización de la temática de la acción.

Adicionalmente, el hecho de incluir un material visual de apoyo (estructurada en 24 diapositivas) aportó la base cognitiva necesaria para ingresar a los estudiantes en una temática técnica y medioambiental. No obstante, el análisis de la intervención misma sugiere que una mera presentación en términos de información se hubieran quedado cortas en tanto que no se hubieran tenido en cuenta elementos como la dinámica de sensibilización. En este caso, la introducción de actividades de tipo participativo en el marco de la educación medioambiental tienen un papel fundamental como puente entre una teoría abstracta y una sugerencia de la realidad de los asistentes, haciéndoles reflexionar sobre la necesidad de la gestión de la biomasa.

Finalmente, la etapa de conclusiones y recuperación de aprendizajes hizo de una técnica de evaluación formativa puesto que a través de ella se observa que los estudiantes retuvieron no solo los conceptos claves de la temática, sino que además desarrollaron una actitud crítica frente a la generación y el aprovechamiento de residuos. Las condiciones validadas nuevamente con la hipótesis de que se necesitan de estrategias mixtas que combinan el exponer teóricamente la temática y promover reflexiones activas para conseguir el máximo de efectividad en los proyectos de concientización.

En definitiva y para acabar podemos decir que el desarrollo de estas sesiones de trabajo confirma el alcance de las finalidades planteadas por el presente proyecto. La metodología utilizada y el trabajo realizado establecieron un espacio de aprendizaje significativo que marca la diferencia para abordar la sostenibilidad y el aprovechamiento de residuos entre los colectivos estudiantiles, pero también unas bases actitudinales de cara a futuras intervenciones ecológicas.

CONCLUSIONES Y **RECOMENDACIONES**

Conclusiones

En la investigación presentada se tuvieron las siguientes conclusiones:

- Se identificó que los desechos biomásicos que se desprenden de las áreas verdes y arboladas del Colegio de Bachilleres de Michoacán es aproximadamente de 1 Ton al mes. Por lo que el potencial de aprovechamiento y de generación de valor agregado y energético para estos desechos es alto.
- Se infiere que la utilización de residuos, para la elaboración de biocombustibles sólidos, en especial briquetas en el sector residencial no sólo dependen de combustibles eficientes con menores impactos ambientales, también es necesario el empleo de dispositivos de uso eficientes. Lo cual se pudo comprobar de forma comparativa, evaluando los cinco residuos biomásicos.
- Para la generación de la bioenergía es un proceso en el que intervienen tres aspectos fundamentales lo social, lo económico en el intervienen tres aspectos fundamentales los social, lo económico y lo ambiental, para poder planificarse de forma multidisciplinaria su producción, uso y explotación. Es importante vincular las normas de sostenibilidad a las políticas de biocombustibles. Para fines de esta investigación el diagnóstico realizado, muestra un gran interés por parte del Colegio de Bachilleres plantel San Francisco Pichátaro, sobre el aprovechamiento de este residuo en algo productivo como lo son las briquetas, como una forma alternativa de cocción y calentamiento a la forma convencional. El gobierno a nivel local como lo es la autonomía de Pichátaro pudiera ser el enlace perfecto para generar proyectos en desarrollo de biocombustibles sólidos y promover la generación de micronegocios para cierto sector de la población, ya que el recurso de residuos biomásicos existente puede abastecer la generación de biocombustibles sólidos. La investigación realizada muestra que es viable económicamente, ambientalmente no es tan contaminante y socialmente es atractivo para los posibles consumidores, con ello las políticas locales pudieran ser el incentivo para la generación de este tipo de proyectos de carácter ambiental y social, y con ello acércanos cada vez más a los objetivos promulgados por la ONU en la agenda 2030, y acércanos más a una transición energética, partiendo de lo local a lo global.
- En síntesis, se ha identificado que los residuos son una excelente materia prima para elaborar briquetas. El uso de estos residuos incrementa el potencial de aprovechamiento de los biocombustibles sólidos procesados reduciendo los impactos al ambiente. Se puede realizar la fabricación de este biocombustible a través de métodos asequibles y de bajo costo, además de que el desempeño de estos es óptimo para actividades básicas de cocción en el sector residencial, principalmente rural. Finalmente, estos biocombustibles son potencialmente escalables y pueden derivar

en una línea de producción, que incentive la generación de valor agregado a desechos maderables, generando empleos y promoción de fuentes renovables de energía.

- La sensibilización en el aprovechamiento de los residuos de biomasa en biocombustibles sólidos es muy limitada en la actualidad, pero hay interés por parte de los alumnos ya que representa una alternativa de aprovechamiento de estos residuos, para actividades cotidianas.

Recomendaciones

- Desarrollar e implementar protocolos para producir, evaluar y transferir el uso de briquetas en dispositivos de uso final en condiciones de campo, las cuales tienen un impacto directo en la salud de los usuarios. Así pues, con lo anterior se puede estimar las tasas de emisión de diferentes gases producidas por las briquetas y determinar que tan viable es la utilización de este combustible.
- Diseñar y construir dispositivos de uso final de cocción, adecuado a las briquetas para tener un mejor parámetro sobre la eficiencia térmica, ambiental y funcionalidad de este biocombustible.
- Impulsar acciones estratégicas para generar el aprovechamiento, producción y consumo de los biocombustibles sólidos, derivados de residuos, derivados de residuos en las comunidades rurales a través de un estudio de mercado detallado para el consumo de las briquetas, y determinar la viabilidad económica de este combustible.
- Realizar la comparación de las briquetas con otros biocombustibles sólidos en (combustión, emisión y procesos de fabricación), producidos a base de residuos de las especies seleccionadas.
- Generar talleres de información en materia de biocombustibles sólidos ya que el éxito de las briquetas dependerá de su uso partiendo desde la recolección del Colegio de Bachilleres de Michoacán plantel San Francisco Pichátaro.
- Hacer análisis económicos para determinar, la viabilidad del uso de combustibles sólidos, contra leña de uso común.
- Dar charlas de los impactos ambientales, para sensibilización y utilización de estas tecnologías.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

- Albarracín-Zaidiza, J. A., Fonseca-Carreño, N. E., & López-Vargas, L. H. (2019). Las prácticas agroecológicas como contribución a la sustentabilidad de los agroecosistemas. Caso provincia del Sumapaz. *Ciencia y Agricultura*, 16(2), 39-55. <https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n2.2019.9139>
- Alberto, G. R. L. (2010). Fabricación y evaluación de eficiencia y emisiones de briquetas a base de residuos agrícolas como alternativa energética al uso de Leña
- Alonso, S., & Florio, L. (1979). Nociones clave para una ecología integral.
- Alvarado Flores, J. J., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2018a). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas. Ciencia y tecnología*, ahead, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002601>
- Arias, D., Gavela, P., & Riofrio, J. (2022). Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. *Revista Técnica «energía»*, 18(2), 91-103. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.494>
- Arnao, W. G., & Lazo, J. V. (2024). Caracterización y microgasificación de pellets de biomasa a partir de residuos leñosos para cocción y calefacción.
- Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018b). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. *Polo del Conocimiento*, 3(7), 420. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>
- Beltrán Hernández De Galindo, M. D. J., & Ramírez-Montoya, M. S. (2019). Innovación en el diseño instruccional de cursos masivos abiertos (MOOC's) para desarrollar competencias de emprendimiento en sustentabilidad energética. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 20, 15. https://doi.org/10.14201/eks2019_20_a5
- Bertero, M. (2011). Energía de la Biomasa: Producción de Bio-Oils. *ConCiencia*, 20, 22-23. <https://doi.org/10.14409/cc.v1i20.2261>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017a). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5-24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.8>
- Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*.
- Carmona, J. C. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. 18.
- Carvajal-Jara, C. A., Tafur-Escanta, P. M., Villavicencio-Poveda, Á. H., & Gutiérrez-Gualotuña, E. R. (2018). Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual

- de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico. *Científica*, 22(2), 113-123. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v22n2a04>
- Cayancela-Muñoz, A. E., Benalcázar-Peñafiel, G., Alvarado-Aguilar, M., Gordillo-Vinueza, G., & Montero-Calderón, C. (2022). Devolatilization as an alternative for energy valorization of bio-medical waste: Kinetic study. *Revista ION*, 35(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v35n2-2022004>
- Césare, M. F., Hilario, F., Callupe, N., Cruz, L., Calle, J. L., & Gonzales, H. E. (2019). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DEL BAMBÚ. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.
- Chávez Altamirano, C. E., López Calvopiña, F. G., Palate Chicaiza, X. M., & Jacome Pilco, C. R. (2021). Potencialidad de Biocombustibles a partir de Residuos Orgánicos. *Revista Scientific*, 6(21), 40-57. <https://doi.org/10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2021.6.21.2.40-57>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013a). LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). CONTENIDO DE HUMEDAD Y SUSTANCIAS INORGÁNICAS EN SUBPRODUCTOS MADERABLES DE PINO PARA SU USO EN PÉLETS Y BRIQUETAS. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 20(1), 77-88. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012>
- De La Cruz-Montelongo, C., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo, J. C., Rosales Serna, R., & Carrillo-Parra, A. (2020a). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y Bosques*, 26(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>
- DEMİRBAŞ, A. (2005). Bioethanol from Cellulosic Materials: A Renewable Motor Fuel from Biomass. *Energy Sources*, 27(4), 327–337. <https://doi.org/10.1080/00908310390266643>
- Doussoulín-Escobar, E., & Chalco-Cano, Y. (2018). Energía solar: Nuevos desafíos para el desarrollo y crecimiento sostenible de la agricultura en zonas desérticas. *Idesia (Arica)*, ahead, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005002304>
- Fengel, D., Greune, A., & Wegener, G. (1983). Charakterisierung von drei Tropenholz ligninen. 37(3), 121–124. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1983.37.3.121>
- Fernández, F., Boluda, C. J., Olivera, J., Guillermo, L. A., Gómez, B., Echavarria, E., & Ferro, D. T., Soler, P. B., & Zanzi, R. (2009). TORREFACCIÓN DE BIOMASA DENSIFICADA.
- García, J. C. C. (2012). Estudio de las transformaciones estructurales del carbón durante el proceso de carbonización por DRX.

- González, J. A. S., Alvarado-Flores, J. J., Rutiaga-Quñones, J. G., & Pintor-Ibarra, L. F. (2023a). Explorando la Cinética Térmica de Biomasa Lignocelulósica a Través de Análisis Termogravimétrico: Enfoques y Aplicaciones. 20.
- González, J. A. S., Alvarado-Flores, J. J., Rutiaga-Quñones, J. G., & Pintor-Ibarra, L. F. (2023b). Explorando la Cinética Térmica de Biomasa Lignocelulósica a Través de Análisis Termogravimétrico: Enfoques y Aplicaciones. 20.
- Guillén, R. V., & Dávila, J. P. (2014). APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS DE BIOMASA LEÑOSA TORREFACTADA. 1.
- Lambea Rueda, A., Grau Ruiz, M. A., & Pastor Albaladejo, G. (2020). La sostenibilidad de la vivienda: Razones para incentivar su desarrollo en España. REVERSCO. Revista de Estudios Cooperativos, 133. <https://doi.org/10.5209/reve.67334>
- Lisperguer, R. C., & Pavez, R. S. (2021). Informe regional sobre el ODS 7 de sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe.
- Lopez-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2000). Evaluating the sustainability of integrated peasantry systems the MESMIS framework. LEISA Magazine, 16(4), 28–30.
- López-Sosa, L. B., & Morales-Máximo, M. (2022). Manual de principios sobre vinculación, innovación y diseño para el desarrollo de proyectos ecotecnológicos (A. Millán-Ramírez (Ed.); 1a ed). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. <https://repositoriouiim.mx/xmlui/handle/123456789/133>
- Loreto, F., Dicke, M., Schnitzler, J., & Turlings, T. C. J. (2014). Plant volatiles and the environment. Plant, Cell & Environment, 37(8), 1905-1908. <https://doi.org/10.1111/pce.12369>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021c). Lignina: Composición, síntesis y evolución. Madera y Bosques, 27(2), e2722137. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Manrique, S. M., Javi, V., Villafañe, F., Binda, C., Salvo, A., Balderrama, B., & Caso, R. (2019). RED INTERNACIONAL EN BIOMASA Y BIOENERGIA: RESULTADOS, APRENDIZAJES Y PROPUESTA DE EVALUACION.
- Morales-Máximo. M., López-Sosa, L.B., & Rutiaga-Quñones, J. G. R. (2018). EVALUACIÓN TERMOGRÁFICA DE LA COMBUSTIÓN DE BRIQUETAS CON AGLOMERANTE VARIABLE DE RESIDUOS MADERABLES DE PINO: ANÁLISIS COMPARATIVO EN FOGONES TRADICIONALES DEL ESTADO DE MICHOACÁN.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa.
- Méndez-Zetina, F. D., Pintor-Ibarra, L. F., Quiñones, J. G. R., & Alvarado-Flores, J. J. (s. f.). Capítulo 6: Análisis elemental en la biomasa con fines energéticos.
- Mendis Gómez, A. (2017). Análisis Elemental Prospectivo De La Biomasa Algal

-
- Mogrovejo-Narváez, D. L., & Quesada-Molina, J. F. (2022). Indicators of urban sustainability for the city of Cuenca-Ecuador: Energy strategies. 7(9).
- Müller, N., Tessini, C., & Segura, C. (s. f.-a). PIRÓLISIS RÁPIDA DE BIOMASA.
- Musule, R., Alarcón-Gutiérrez, E., Houbroun, E. P., Bárcenas-Pazos, G. M., Del Rosario Pineda-López, M., Domínguez, Z., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of *Abies religiosa* across an altitudinal gradient. *Journal of Wood Science*, 62(6), 537-547. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1585-0>
- Niu, L., & Liao, W. (2016). Hydrogen Peroxide Signaling in Plant Development and Abiotic Responses: Crosstalk with Nitric Oxide and Calcium. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00230>
- Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—Significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Ortiz García, J. E., González Morales, D. E., Mejía Agudelo, Y., García-Alzate, L. S., & Cifuentes-Wchima, X. (2020). Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*. *Revista ION*, 33(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020009>
- Pecci-Oviedo, M. (2020). Good practices towards the fulfillment of SDG 7 “Affordable and Clean Energy”. *Revista Científica de la UCSA*, 7(3), 72-75. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2020.007.03.072>
- Pellicer-Sifres, V., Belda-Miquel, S., Cuesta-Fernandez, I., & Boni, A. (2018). Learning, transformative action, and grassroots innovation: Insights from the Spanish energy cooperative Som Energia. *Energy Research & Social Science*, 42, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.001>
- Perdices, M. B. (2017). EL PAPEL DE LA BIOENERGÍA EN LA NUEVA BIOECONOMÍA.
- Pérez-Vinent, A. R., Serret-Guasch, N., & Penedo-Medina, M. (2022). Caracterización de la biomasa vegetal aserrín de pino.
- Raffaelli, N. (2020). CAPÍTULO 6 Dendroenergía: Biocombustibles sólidos.
- Ramírez-Contreras, N. E., Munar-Florez, D., Hilst, F. V. D., Espinosa, J. C., Ocampo-Duran, Á., Ruíz-Delgado, J., Molina-López, D. L., Wicke, B., Garcia-Nunez, J. A., & Faaij, A. P. C. (2021). GHG Balance of Agricultural Intensification & Bioenergy Production in the Orinoquia Region, Colombia. *Land*, 10(3), 289. <https://doi.org/10.3390/land10030289>
- Ramírez-Quiroga, H. (2025). Análisis de métodos para estimación de temperatura de combustión de biomasa.
- Ramírez-Ramírez, A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Mendez, J. os. R., Hernández-Solís, J. J., & Lujaán-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy
-

- Generation.BioResources, 15(4), 8529–8553. <https://doi.org/DOI:10.15376/biores.15.4.8529-8553>.
- Ríos-Badrán et al. - 2019—SOLID BIOFUELS A SUSTAINABLE AND ECONOMIC ALTERNA.pdf.
- Rivera Albarracín, L. (2019). El cambio climático y el desarrollo energético sostenible en América Latina y el Caribe al amparo del Acuerdo de París y de la Agenda 203. Documentos de Trabajo. <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.DT15>
- Rodríguez, N. A. G. (2021). EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PODA DEL CAMPUS DE LA 170 PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.
- Rojas, P. A., Rodríguez, M. C. A., Razuri, J. C., Rodríguez, J. C. F., & Sánchez, D. E. G. (2021). TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAGÍSTER EN ADMINISTRACIÓN ESTRATÉGICA DE EMPRESAS OTORGADO POR LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Rowell, D. P. (2012). Sources of uncertainty in future changes in local precipitation. *Climate Dynamics*, 39(7), 1929–1950. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1210-2>
- Ruiz, A. F., Peñaranda, C. J., Fuentes, G., & Semprun, M. D. (2020). Análisis comparativo de resultados en el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como material sustituyente del cemento portland en el concreto. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 11(2), 8-17. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.51>
- Sluiter, J. B., Ruiz, R. O., Scarlata, C. J., Sluiter, A. D., & Templeton, D. W. (2010). Compositional Analysis of Lignocellulosic Feedstocks. 1. Review and Description of Methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(16), 9043–9053. <https://doi.org/10.1021/jf1008023>
- Sun, Y., & An, Z. (2005). Late Pliocene-Pleistocene changes in mass accumulation rates of eolian deposits on the central Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23). <https://doi.org/10.1029/2005JD006064>
- Torres, L. O. (2008), Producción de Biocombustibles Sólidos de Alta densidad en España. *Boletín del CIDEU* 5: 107-123 (2008) ISSN 1885-5237
- Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J. M., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2004). LOS APORTES DE NITRÓGENO EN LA AGRICULTURA. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, X(2), 173-178. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2002.07.039>
- Utn - Rectorado, S. A. Y. P. (2022). VI Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorandos en Ingeniería. *AJEA*, 15. <https://doi.org/10.33414/ajea.1140.2022>
- Vargas Alvarez, Sebastián., Acosta Leal, M., & Sánchez Castillo, R. (2013). Historia, memoria, pedagogía una propuesta alternativa de enseñanza aprendizaje de la historia. *Corporación Universitaria Minuto de Dios*.

-
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Villarroel Bastidas, J., & Macías Vera, J. (2021). Biocombustible Sólido A Partir De Residuos Que Generan Los Procesos Agroindustriales Del Sector El Empalme. *Ingeniería e Innovación*, 8(22). <https://doi.org/10.21897/23460466.2333>
- Chicaiza Toro E., Natascua Pai N., & Diaz Abanchoza E. H. (2023) Vista de El compostaje y el manejo de los Residuos Sólidos Orgánicos para mantener un entorno saludable en la Institución Educativa Técnica Agropecuaria Ambiental Bilingüe Inda Sabaleta. (2023).
- Weiland, S., Hickmann, T., Lederer, M., Marquardt, J., & Schwindenhammer, S. (2021). The 2030 Agenda for Sustainable Development: Transformative Change through the Sustainable Development Goals? *Politics and Governance*, 9(1), 90-95. <https://doi.org/10.17645/pag.v9i1.4191>
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B.-J., & Hupa, M. (2011). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.010>
- Windeisen, E., Klassen, A., & Wegener, G. (2003). On the chemical characterisation of plantation teakwood from Panama. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 61(6), 416–418. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0425-2>
- Zamora, E. A. A. (2013). Identificación del mecanismo de solvatación de biomasa lignocelulósica con líquidos iónicos.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo A Presentación de la charla de sensibilización sobre el aprovechamiento de los residuos biomásicos.

 Charla de sensibilización del aprovechamiento de los residuos biomásicos Presenta: Ramiro Gudiño Macedo	Efectos en el medio ambiente de la actividad humana ▶ La actividad humana, ocasiona un desgaste al medio ambiente. ▶ Uso de combustibles de residuos fósiles, emiten compuestos de carbono y azufre que alteran la composición del aire y contribuyen al agotamiento de la capa de ozono. ▶ Deforestación, la tala para agricultura y urbanización reduce la cubierta forestal, provoca erosión del suelo y destruye hábitats esenciales. ▶ Cambio climático, Las actividades humanas desestabilizan el clima natural del planeta, generando eventos extremos cada vez más frecuentes e intensos. (Inundaciones, huracanes, sequías, nivel del mar, etc.)
Desafío energético de México: La dependencia de combustibles fósiles. Fuentes Tradicionales de energía: ▶ El carbón, gas natural y petróleo. Son combustibles fósiles finitos que generan un alto impacto ambiental, y contribuyen al cambio climático. Urgencia de cambio: Es importante buscar alternativas energéticas limpias, renovables y sostenibles para garantizar un futuro energético independiente.	La Biomasa ▶ La biomasa es materia orgánica abundante en México, que se puede convertir en energía se generan millones de toneladas agrícolas y forestales cada año. ▶ Fuente energía renovable, ya que se regenera constantemente, (madera, desechos agrícolas, residuos forestales, cultivos energéticos, residuos urbanos orgánicos). ▶ Se genera energía con la quema controlada para generar calor de manera eficiente. Solución a un problema. Estos residuos, si no se gestionan adecuadamente, contribuyen al efecto invernadero. Sin embargo, representan una oportunidad única para generar energía limpia, transformando desechos orgánicos en energía limpia y renovable.
Biomasa Residual: aprovechable para la elaboración de biocombustibles sólidos. ▶ Poda estacional ▶ Residuos agrícolas ▶ Residuos forestales disponibles localmente ▶ No utiliza suelos adicionales, para generarse	De residuo a recurso: el potencial de las briquetas. ▶ Densificación: proceso de compactación de biomasa residual bajo presión. ▶ Biocombustible Sólido: Producto estable, transportable y de alto valor energético. ▶ Energía Limpia: Alternativa eficiente a leña y combustibles fósiles para calor. ▶ Las briquetas son eficientes, económicas y fáciles de producir y usar, demostrando viabilidad para sectores residenciales de baja potencia calorífica.

Beneficios de la briquetas ▶ Energía renovable, manteniendo un control de uso. ▶ Reduce la dependencia de combustibles fósiles. ▶ Reduce la emisión de gases de efecto invernadero. ▶ Disminuye la cantidad de desechos en vertederos. ▶ Reduce acumulación de residuos orgánicos ▶ Disminuye la deforestación ▶ Energía limpia y accesible ▶ Autonomía energética.	Transición energética ▶ La biomasa es clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. ▶ Promueve el uso de la biomasa en tu comunidad. ▶ Construyamos un futuro energético más limpio, eficiente y sostenible.
Futuro: ¿Prevención o Corrección? ▶ Corrección de Daños, actuar después del impacto: restaurar, limpiar contaminación y mitigar consecuencias, en algunos casos irreversibles. ▶ Prevención de Impactos, Analizar el riesgo ecológico antes de actuar: planificar con visión sostenibles, reducir emisiones y proteger los recursos naturales desde el inicio. ▶ La elección entre corregir y prevenir definirá muchos aspectos de la vida del medio ambiente.	▶ Gracias por su Atención

Anexo B Actividad de la charla de sensibilización de los residuos biomásicos. Al alumnado del COBAEM.

	Universidad Intercultural Indígena de Michoacán Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética.			
	Instrumento de charla de sensibilización de aprovechamiento de residuos de biomasa.			
	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOENERGÉTICO DE RESIDUOS DE BIOMASA CASO DE ESTUDIO: PLANTEL DEL COLEGIO DE BACHILLERES			
	Objetivo: Medir el grado sensibilización sobre la charla, para el aprovechamiento de residuos biomásicos, y a la utilización de otras fuentes de energía calorífica, para uso doméstico.			
1.-	¿Conoces los impactos de la actividad humana sobre el medio ambiente?			
	si	no	Descripción:	
2.-	¿Conoces la biomasa?			
	si	no	Especificar:	
3.-	¿Qué efectos tienen sobre el medio ambiente la utilización de energías procedentes de residuos fósiles?			
	Especificar los efectos:			
4.-	¿Qué fuentes energéticas utilizas en tú casa para calentar agua o cocer alimentos?			
	Comentar la fuente de energía:			
5.-	¿Has utilizado leña para calentar agua o cocer alimentos?			
	si	no	Especificar uso:	
6.-	¿En tu escuela se generan residuos biomásicos?			
	si	no	¿Cuáles?	
7.-	¿Consideras importante aprovechar estos residuos para la generación de energía calorífica?			
	si	no	¿Por qué?	
8.-	¿Conoces los biocombustibles sólidos?			
	si	no		
9.-	¿Has utilizado combustibles sólidos como fuente de energía??			
	si	no	¿Para qué?	
10.-	¿Crees que cambio de tecnología pudiera mejorar el medio ambiente?			
	si	no	¿Por qué?	

Anexo C Artículo Indexado

Article

Characterization of Residual Woody Biomass for the Production of Densified Solid Biofuels and Their Local Utilization

Mario Morales-Máximo ^{1,2} , Ramiro Gudiño-Macedo ³, José Guadalupe Rutiaga-Quiñones ¹ ,
Juan Carlos Coral-Huacuz ³, Luis Fernando Pintor-Ibarra ¹, Luis Bernardo López-Sosa ^{2,*} ,
and Víctor Manuel Ruíz-García ^{4,5,*} 

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica SN, Ciudad Universitaria, Morelia 58040, Mexico; mmoralesmaximo@gmail.com or mario.morales@uiim.edu.mx (M.M.-M.); jose.rutiaga@umich.mx (J.G.R.-Q.); luis.pintor@umich.mx (L.F.P.-I.)

² Maestría en Educación Ambiental, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro 61614, Mexico

³ Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro 61614, Mexico; ramiro.gudino.mise12009@uiim.edu.mx (R.G.-M.); jcarlos.corralhuacuz@uiim.edu.mx (J.C.C.-H.)

⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia 58190, Mexico

⁵ Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), Ciudad de Mexico 03940, Mexico

* Correspondence: lbernardo.lopez@uiim.edu.mx (L.B.L.-S.); vruiz@cieco.unam.mx (V.M.R.-G.)

Abstract

The energy utilization of residual woody biomass is a relevant strategy for the decentralized energy transition and local waste management in rural areas. The objective of this study was to characterize (physically, chemically, and energetically) five types of residual biomass: pine branches, huinumo (this material refers to the long, thin pine needles that, after drying and falling, form a layer on the forest floor), cherry branches and leaves, and grass waste generated in the community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico, in order to evaluate its viability for the production of densified solid biofuels. A comprehensive analysis was conducted, including moisture content, higher heating value, proximate characterization, structural chemical analysis (using the Van Soest method), elemental CHONS analysis, ash microanalysis (by ICP-OES), and a multicriteria analysis with normalized energy and compositional indicators. The results showed that huinumo and cherry leaves were the most outstanding biomasses, presenting the highest heating values (20.7 MJ/kg) and low moisture and ash contents. Pine branches obtained the most balanced results, characterized by their equilibrium in fixed carbon and lignin, as well as their low potassium content. The multicriteria analysis showed that there is no absolute optimal biomass; however, it indicates that pine branches and huinumo are the most robust feedstocks for the production of briquettes or pellets. The results confirm the significant technical and environmental potential of local lignocellulosic residues for the production of solid biofuels and for contributing to sustainable energy solutions at the local scale.

Keywords: agroforestry residues; technical parameters; pellets; briquettes; multicriteria analysis



Academic Editor: Nikolaos C. Kokkinos

Received: 28 February 2026

Revised: 24 March 2026

Accepted: 7 April 2026

Published: 10 April 2026

Copyright: © 2026 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\) license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The sustainable use of residual woody biomass for the production of densified solid biofuels (pellets and briquettes) is emerging as a key strategy to diversify energy options in

communities and to contribute to the mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions [1]. There is an increasing effort to revalorize forest residues, transform energy consumption and production strategies, and reduce environmental impacts. These strategies address public policies aimed at GHG reduction, decarbonization of the energy sector, and the generation of a local circular economy. The conversion of lignocellulosic residues into densified solid biofuels integrates several dimensions, such as sustainable forest management, local energy security, and the reduction in environmental impacts associated with the extraction and use of fossil fuels [2,3].

Bioenergy from a sustainability perspective requires the evaluation of the energy potential of biomass, but also of socio-environmental impacts from the extraction and management of woody residues to their final use, including carbon footprint analysis, land-use change, and local socioeconomic benefits, among others [4]. Recent studies highlight the need for robust integrated frameworks that combine life cycle assessment, sustainability criteria, and territorial governance models in order to avoid jeopardizing biodiversity and the ecosystem goods and services provided by biomass extraction and use [5,6].

In this context, the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs) provide a regulatory and policy framework that governs the sustainable use of renewable resources and the eradication of energy poverty through decentralized and clean pathways. The production of densified materials from woody residues can contribute to achieving the SDGs for affordable and clean energy (SDG 7), decent work and local economic growth (SDG 8), and climate action (SDG 13), provided that sustainability and equity criteria are incorporated into their supply chain [7].

The types of biomass that can help achieve these objectives include a wide variety of lignocellulosic materials: agricultural residues, industrial by-products, and forest residues [8,9]. Considerations regarding residual woody biomass are more limited. On the one hand, residues from sawmills, pruning, and forest management cuts present relatively homogeneous profiles compared to agricultural biomass. On the other hand, they show variability in density, resin content, lignin-to-cellulose proportion, and mineral content, which affects their energy and densification properties. In addition, regional quantifications and case studies make it possible to determine the technical availability of this resource, as well as logistical limitations for its extraction and transport, which are key aspects in the design of local value chains for densified biofuels [10,11].

There are various energy uses for biomass. The use of residual woody biomass in decentralized systems (household boilers, micro-plants, district heating) or in industrial chains (co-combustion in thermal power plants, cogeneration) will largely depend on the homogeneity and quality of the biofuel [12,13]. Recent studies [14,15] have highlighted the synergy between energy policies, incentives for waste valorization, and technological improvements in material treatment and densification to ensure competitiveness with fossil fuels.

The quality of solid biofuels involves physicochemical evaluations, such as proximate analysis, heating value, thermogravimetric analysis (TGA), ultimate analysis, determination of moisture, and ash content. These evaluations constitute the experimental basis for the implementation of optimal densification processes [16,17]. Studies combining proximate and ultimate analyses together with calorimetry and TGA show how modifications in mineral and extractive content influence combustion efficiency, deposit formation, and atmospheric emissions. The adoption of standardized characterization procedures enables comparison between studies and their stable application in industrial processes [18–20].

Biomass characterization makes it possible to determine the potential of biomass residues and the conversion technologies required for the production of densified solid

biofuels. Minimum biofuel quality standards help optimize energy efficiency and minimize ash generation and emissions [21,22].

Likewise, the pretreatment of biomass must be taken into account, since pretreatment optimizes its effective use, although it increases costs and affects commercial viability. Therefore, it is vital to select suitable biomass types to generate competitive solid biofuels that can be made without pretreatment in order to minimize associated costs. In this regard, the profitability of the process depends on balancing the cost of pretreatment with the energy quality of the final product [23].

In Mexico, the utilization of residual biomass in rural areas faces a significant knowledge gap. Recent research has quantified the bioenergy potential by region [24] and evaluated the efficiency of direct combustion technologies [25]. However, the literature does not offer logistic models for small-scale biorefineries in geographically dispersed locations [26]. This article addresses these gaps by characterizing local residual biomass flows to propose a valorization strategy that incorporates previously ignored socio-environmental variables, with the aim of promoting rural energy sovereignty.

Pellets and briquettes are biomass-based fuels that undergo a densification process to increase energy density and facilitate handling, thereby reducing logistical costs. The quality of densified materials is determined through physical–mechanical characterization (bulk density, durability, and impact resistance), thermochemical characterization (heating value, thermal, and combustion efficiency), and environmental assessment (emissions and heavy metal content) [27]. In this regard, pellets (small compacted cylindrical particles) have been the subject of numerous studies analyzing the effect of moisture content, particle size, die temperature, and pretreatments (such as torrefaction) on key quality parameters. Comparative experimental studies confirm that standardization norms (EN; ISO) and pretreatments broaden the range of raw materials that can meet or adjust to commercial quality parameters [28].

On the other hand, briquettes (larger and denser blocks than pellets) are useful for both industrial and domestic applications. To achieve adequate compression parameters, binders are required [29], and thermal treatments influence durability, heating value, and combustion contaminants [30,31].

The objective of this research is to conduct a comprehensive analysis involving the characterization of biomass residues, their technical feasibility for conversion into densified solid biofuels, and the challenges of revalorization for use in a local rural context. The study performs a robust characterization of five types of residual forest biomass collected in a rural area, analyzing physical, chemical, and energy parameters relevant to densification processes (briquette or pellet production). An approach was conducted to establish technical feasibility criteria for transforming biomass residues into densified solid biofuels, aiming to avoid environmental impacts derived from improper disposal and to contribute to the valorization of local resources. Finally, this study provides baseline information for the design of appropriate ecotechnologies for use in rural environments.

2. Materials and Methods

The methodological process carried out in this research can be observed in Figure 1, which is based on methodologies proposed for the production of solid biofuels [32,33].

Methodology

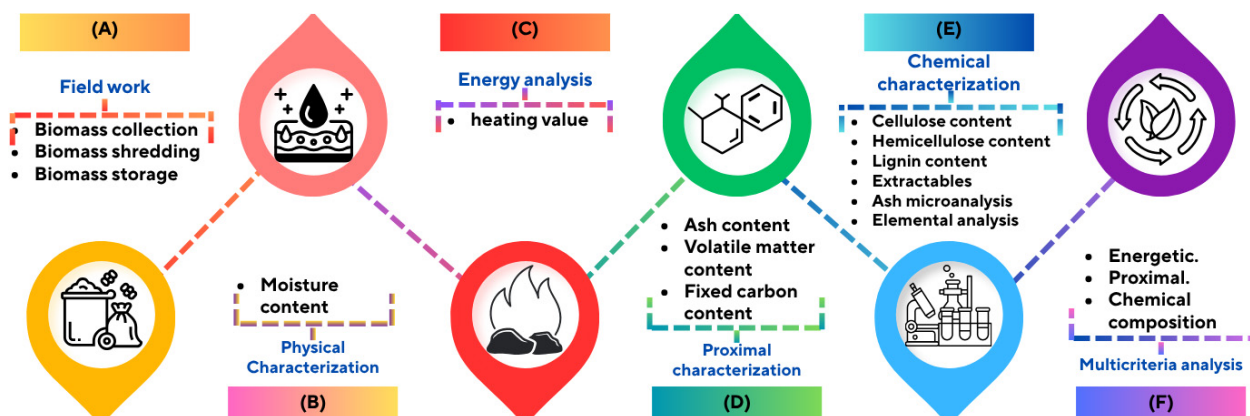


Figure 1. Methodological diagram for the characterization of residual biomass.

2.1. Study Area

The study was conducted in an area of the locality of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico (19.566–101.802°). The study area covered 1.21 ha, of which only the areas with biomass residue production were quantified.

The types of biomasses collected were: pine branches (*Pinus* spp.), huinumo from *Pinus* spp., cherry branches, cherry leaves, and grass. Pruning shears and cutting bars were used for collection, along with rigid containers for gathering residues and clean plastic bags for storage. The different samples were identified using codes and labels (sampling location, biomass type, date).

For each type of biomass, 4 kg of material were collected. An open-air drying process was carried out. Once dried, the biomass samples were shredded and ground to reduce and homogenize particle size. After grinding, the biomass was sieved through a 40-mesh screen to ensure particle size distribution (flour-like form). Finally, the conditioned biomass samples were stored in airtight containers in a dry environment at room temperature to prevent moisture absorption and contamination with foreign substances.

2.2. Determination of the Moisture Content and Calorific Value of Biomass

For physical characterization, moisture content analysis was performed following the UNE-EN 14774-1 (2010) standard. An AE Adam PMB 53 moisture analyzer was used (Adam Equipment Co. Ltd., Milton Keynes, UK), and 4 g of pine meal (425 µm mesh) were placed in the analyzer. The process was performed in triplicate for each sample [34].

To determine the higher heating value (HHV), a Parr 6100 calorimeter was used (Parr Instrument Company City; Moline, IL, USA), with a titanium crucible for the samples, an ignition wire, a steel bucket containing 2 L of distilled water weighed on a platform scale, an oxygen bomb, and a hermetically sealed stainless steel container [12].

2.3. Proximate Characterization

Ash content was determined following the UNE-EN 14775 (2010) standard, and volatile matter content was determined according to the ASTM E872-82 (2013) standard [35]. For these analyses, completely dried biomass previously sieved through a 40-mesh screen was used. Fixed carbon content was determined by difference—subtracting the percentages of ash and volatile matter from 100% [36].

2.4. Chemical Characterization

Chemical composition was determined following standardized UNE-EN 14775 (2010) procedures [37]. The main polymeric components of wood (cellulose, hemicelluloses, and lignin) were determined through fiber analysis using the Van Soest gravimetric procedure with α -amylase application. Extractive content was determined by difference subtracting from 100% the percentages of cellulose, hemicelluloses, lignin, and ash, including a correction factor for ash, as indicated in the literature [35]. An ANKOM fiber analyzer (model ANKOM200, ANKOM Technology, Macedon, NY, USA) was used for polymer analysis.

Subsequently, ash microanalysis was performed using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) in a VARIAN 730-ES system (Varian Inc., Agilent Technologies, Mulgrave, Australia) [20,38].

Finally, elemental analysis consisted of determining the main biomass components: carbon (C), hydrogen (H), oxygen (O), nitrogen (N), and sulfur (S). Determinations of C, H, N, and S were performed in duplicate using a COSTECH elemental analyzer model 4010 (COSTECH International S.P.A., Milan, Italy), in accordance with UNE-CEN/TS 15104 EX [39]. Oxygen content was calculated by difference for all analyzed biomass types [36].

2.5. Multicriteria Analysis

Multicriteria analysis is a validated methodology for evaluating processes and technologies using sustainability indicators [40]. In this work, it was used for the multifactorial evaluation of lignocellulosic biomass derived from various forestry activities, comparing it with other biofuels. The evaluation was performed using the MULTIBERSO software 2022 [41], replicating methodological approaches previously reported in the scientific literature [6,42,43]. This approach requires comparison with pre-existing data and gives researchers the flexibility to propose and weight specific indicators according to the study objectives [32]. For this research, energy, proximate analysis, and chemical composition parameters were prioritized, given their fundamental relevance in the generation of solid biofuels. Thus, the methodology allows for emphasizing the criteria with the greatest technical relevance, ensuring a rigorous evaluation adapted to the object of study.

3. Results and Discussion

3.1. Identification of the Different Residual Woody Biomass Types

Table 1 shows the different biomass species and predominant residues such as *Pinus* spp. (pine), huinumo, cherry (branches and leaves), as well as the high presence of wild grass. These lignocellulosic residues occur recurrently and can be considered potential feedstocks for producing solid biofuels. The diversity and availability of biomass residues demonstrate an appropriate setting for the energy utilization of residual biomass generated at the study site.

Table 1. Estimation of biomass residues.

Type of Biomass	Weekly Amount (kg)	Monthly Amount (kg)	Annual Amount (kg)
Pine branches	1.4	5.6	72.8
Huinumo	5	20	260
Cherry branches	0.04	0.16	2.08
Cherry leaves	1.3	5.2	67.6
Grass	48	192	2496
Total	55.74	222.96	2898.48

Note: The data in Table 1 correspond to the estimate of biomass waste from the total of 1.21 ha taken into account for this research.

The data shown in Table 1 indicate biomass generation of 55.74 kg/week, 222.96 kg/month, and 2898.48 kg/year. Although these are preliminary quantities, they represent a significant volume of biomass residues that could be used for energy purposes, particularly for the production of solid biofuels such as briquettes or pellets, which could be employed locally for cooking or heating systems.

From a territorial perspective, analysis of residue distribution within the study area reveals that approximately 79% of the total surface corresponds to green areas, which directly increases the potential for residual biomass generation [44].

The identification and prioritization of high-yield biomass areas not only allow for a more reliable estimation of available residue volumes but also help guide management strategies to maximize energy utilization. In this sense, the diagnosis carried out provides adequate support for planning sustainable biomass waste management strategies.

3.2. Proximate Analysis and Energy Content

Table 2 presents the results of the proximate analysis and energy content of the five collected biomass types. The results are presented as mean values with their corresponding standard deviations.

Table 2. Proximate analysis and energy content of the collected biomass residue samples.

Biomass Samples	HHV (MJ/kg)	Moisture Content (%)	Ash Content (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)
Pine branches	19.53 (± 0.10)	11.64 (± 0.54)	0.14 (± 0.03)	82.45 (± 0.44)	17.53 (± 0.44)
Huinumo	20.73 (± 0.02)	9.84 (± 0.61)	0.03 (± 0.06)	77.56 (± 1.06)	22.43 (± 1.06)
Cherry branches	19.11 (± 0.06)	9.71 (± 0.23)	0.03 (± 0.02)	81.18 (± 0.92)	18.81 (± 0.92)
Cherry leaves	20.66 (± 0.09)	9.39 (± 1.23)	0.05 (± 0.01)	79.88 (± 0.64)	20.11 (± 0.64)
Grass	17.28 (± 0.06)	9.87 (± 0.19)	0.07 (± 0.08)	78.24 (± 0.92)	21.74 (± 0.92)

In Table 2, the moisture content generally shows that the values are relatively low and similar for each type of biomass, with an average range from 9.39% (± 1.23) to 11.64% (± 0.54). Pine branches showed the highest moisture content (11.64%), while cherry leaves showed the lowest (9.39%). These levels are considered adequate for energy applications, as moisture contents below 12% favor better combustion performance and higher useful energy output. According to the scientific literature [45], moisture contents below 12% promote higher energy efficiency, since energy losses associated with water evaporation during combustion are reduced. Previous studies on woody residues report moisture contents around 10% [46,47], while others report values between 12% and 16%. The values obtained in this study are similar to or lower than those reported in the literature [48].

Finally, the significantly lower moisture levels recorded in this study are attributed to the interaction between drying efficiency and the climatic conditions of the study area. In regions characterized by periods of intense heat, biomass conditioning is accelerated, reducing its hygroscopic capacity to retain water compared to environments with higher relative humidity. According to Zhao et al. (2026) [49], the equilibrium moisture content of biomass is intrinsically dependent on ambient temperature and humidity; therefore, a warm climate favors a mass transfer gradient that shifts the equilibrium toward lower values. At the experimental level, strict adherence to the conditioning standards described in the methodology allowed for achieving a stable and reproducible moisture content. This synergy between local climatic advantages and technical standardization explains the optimized residue compared to other reports in the literature [50,51].

Regarding the heating value, the differences among the biomasses are small. Huinumo and cherry leaves show the highest values, 20.73 MJ/kg (± 0.02) and 20.66 MJ/kg (± 0.09),

respectively, indicating greater energy potential. These results are comparable to values reported for hardwoods and high-energy-density forest residues; for example, average heating values between 19.0 MJ/kg and 22.0 MJ/kg have been reported for this type of material [52], while other studies report values ranging from 19.978 MJ/kg to 20.812 MJ/kg [53]. In contrast, grass shows the lowest heating value, 17.28 MJ/kg (± 0.06), which may be related to a higher proportion of volatile components. This is consistent with previous studies that attribute this behavior to a lower proportion of lignin and structural carbon in herbaceous biomasses [54]. The literature reports averages between 13.7 MJ/kg and 16.1 MJ/kg [55], while other studies report ranges from 15.924 MJ/kg to 16.790 MJ/kg [56]. The low standard deviation observed in all samples suggests high homogeneity and reliability of the measurements.

Ash content was low in all samples ($<0.15\%$), which favors operational and energy performance. The lowest ash fractions were found in huinumo and cherry branches (RC), both with 0.03% (± 0.02), while the highest ash content was recorded in pine branches (RP), with a value of 0.14% (± 0.03). This suggests a lower risk of fouling, slagging, and corrosion problems during thermochemical conversion processes in combustion technologies. These values are below the ranges commonly reported for agricultural and forest residues [57].

Regarding volatile matter content, the biomasses showed high values, as is characteristic of lignocellulosic materials. Pine branches and cherry branches showed the highest volatile contents, 82.45% (± 0.44) and 81.18% (± 0.92), respectively, indicating high ignitability and rapid gas release during combustion. In contrast, huinumo showed the lowest volatile matter content, 77.56% (± 1.06), which is associated with a higher fixed carbon fraction. The literature reports that hardwoods such as red oak (sapwood and heartwood) present average volatile matter contents between 81.6% and 81.8% , while yellow poplar (sapwood and heartwood) shows averages between 83.5% and 83.6% [58]. Some tropical species report averages between 77.5% and 87.6% [59]. Regarding volatile matter in grass residues, the literature reports average values ranging from 54.8% to 74.3% [60], while other studies report averages of 78% [61]. In general, the volatile matter results obtained for the five analyzed biomass samples are consistent with values reported in the literature and even exceed those corresponding to some previously documented species.

The fixed carbon content is related to the volatile matter content. Huinumo and grass showed the highest fixed carbon values, 22.43% (± 1.06) and 21.74% (± 0.92), respectively, indicating stable and long-lasting combustion with lower flammable gas release. In contrast, pine branches showed the lowest fixed carbon content, 17.53% (± 0.44), and a higher proportion of volatile matter. The scientific literature reports average fixed carbon contents ranging from 12% to 26% for wood species used in industry [62]. Another reported species is *Araucaria angustifolia*, with an average value of 21.4% [63]. For grass biomass, values between 30% and 32% are reported [64].

Overall, the results show that huinumo and cherry leaves have the highest calorific value and fixed carbon content, making these biomasses attractive for energy purposes, while pine and cherry branches have a higher volatile fraction that contributes to rapid ignition. As for grass, despite its low ash content, it does not present equally favorable energy characteristics. The low statistical variability observed in most parameters supports the consistency and reliability of the results obtained.

3.3. Basic Chemical Analysis

The results of the basic chemical analysis of the biomass waste samples are presented in Table 3, which shows the average values and their standard deviations. This analysis was performed to determine the percentage of cellulose, hemicelluloses, lignin, extractive,

and ash content at 525 °C, which is essential for understanding the structural composition and energy quality of the evaluated materials.

Table 3. Basic chemical analysis of biomass samples.

Biomass Samples	Cellulose (%)	Hemicelluloses (%)	Lignin (%)	Extractives (%)	Ash (525 °C)
Pine branches	29.40 (±0.51)	14.11 (±0.78)	24.03 (±0.41)	32.03 (±0.60)	0.42 (±0.04)
Huinumo	18.94 (±0.49)	13.22 (±0.59)	17.90 (±0.56)	49.47 (±0.56)	0.48 (±0.04)
Cherry branches	32.06 (±0.56)	15.6 (±0.65)	16.02 (±0.72)	35.88 (±0.67)	0.44 (±0.04)
Cherry leaves	15.11 (±0.66)	12.1 (±1.13)	19.04 (±0.60)	53.20 (±0.76)	0.55 (±0.05)
Grass	24.54 (±1.01)	35.37 (±0.85)	3.72 (±0.97)	35.25 (±1.02)	1.12 (±0.12)

According to Table 3, the cellulose content ranged from 15.11% (±0.66) to 32.06% (±0.56), values that fall within the expected range for lignocellulosic residues. However, these values are lower than those reported for pure agricultural biomass (40–60% cellulose) cited in recent reviews [65,66], where cellulose is described as the dominant structural fraction [67]. Woody samples, such as cherry branches (32.06%) and pine branches (29.4%), showed the highest cellulose contents, while cherry leaves (15.11%) and huinumo (18.94%) exhibited considerably lower values, reflecting the structural differences between woody and foliar tissues.

Regarding hemicelluloses content, grass showed the highest value (35.37%), clearly exceeding the values observed in tree samples (12.1–15.6%). This is similar to herbaceous residues, which are characterized by higher proportions of amorphous polysaccharides and therefore faster thermal degradation processes compared to woody materials. The literature reports hemicelluloses contents of approximately 27.80% for woody biomass [68], with average ranges between 20.73% and 30.84% [69], indicating that the analyzed samples are consistent with previously reported values.

Lignin content was higher in pine branches (24.03%) and cherry leaves (19.04%), indicating greater structural recalcitrance typical of woody tissues, compared to grass, which showed very low lignin content (3.72%). Lignin is directly associated with mechanical strength and resistance to thermal decomposition, playing a determining role in thermochemical processes such as pyrolysis and combustion [70,71]. The values obtained in this research are consistent with reported ranges in the literature: 15–25% in hardwood, 25–35% in softwood, and 15–25% in herbaceous biomass [72].

The extractive fraction was particularly high in cherry leaves (53.2%) and huinumo (49.47%), suggesting a wide presence of compounds soluble in organic and aqueous solvents, such as resins, oils, and secondary metabolites. These compounds may significantly influence thermal degradation behavior and the composition of derived products, including bio-oil during pyrolysis [73]. In contrast, pine and cherry branches exhibited moderate extractive contents (32–36%).

Ash content was low in all samples, particularly in woody materials (<0.6%), whereas grass showed a higher value (1.12%). This finding aligns with previous studies that associate higher mineral content with herbaceous biomass, potentially affecting thermochemical processes due to the presence of inorganic elements that influence energy yield and generate impurities during combustion or gasification [74].

Finally, it can be mentioned that the different levels of chemical composition in the analyzed biomasses clearly influence their utilization for energy purposes or within the context of lignocellulosic biorefineries. Biomasses with high levels of cellulose and lignin (pine or cherry branches) tend to have greater energy potential in thermochemical applications, since these structural fractions (both cellulose and lignin) are associated with higher energy density, as shown in recent studies on the thermochemical conversion of lignocellulose [75].

High hemicellulose fractions and the extractives present in grass and leaves may exhibit greater thermal reactivity, which is especially useful for processes aimed at increasing the production of biochemicals and bio-oils, or in processes where the volatilization of soluble species is enhanced, as mentioned in recent reviews on the effects of extractive fractions on pyrolysis product distribution [76]. Although ash content is low in absolute terms, it remains a critical parameter in industrial applications, as it affects equipment lifespan, maintenance costs, and thermal efficiency, especially when exceeding recommended operational limits (<1%) [77].

3.4. Microanalysis of Ash

The results of the ash microanalysis of the different biomass waste samples are presented in Table 4, which shows the concentrations of major elements in parts per million (ppm). In general terms, the chemical composition of the ash highlights a clear predominance of alkaline and alkaline earth elements, typical of forest and herbaceous biomass.

Table 4. Microanalysis of major elements in ash (ppm).

Element	Huinumo	Cherry Leaves	Pine Branches	Cherry Branches	Grass
Ag	<0.0125	ND	2.86	ND	2.40
Al	11,599.55	780.51	15,402.40	3152.75	2956.29
As	ND	ND	ND	ND	ND
B	124.17	142.21	211.98	146.96	137.75
Ba	102.00	221.84	354.18	477.94	263.96
Be	ND	ND	ND	ND	ND
Ca	114,902.03	139,958.00	185,559.00	234,890.22	220,561.88
Cd	ND	ND	<0.05	ND	ND
Co	ND	ND	<0.05	ND	ND
Cr	12.64	3.60	10.09	2.08	11.78
Cu	49.38	100.02	157.63	125.65	111.61
Fe	6773.19	1044.19	8760.40	2197.29	2040.82
K	56,306.42	193,950.00	44,154.00	63,825.35	60,390.72
Li	47.01	20.47	87.93	24.26	42.51
Mg	55,147.07	43,596.80	33,442.85	35,556.69	33,040.22
Mn	2404.12	394.91	2108.37	1058.16	517.70
Mo	ND	ND	ND	ND	<0.05
Na	2873.52	1357.34	2270.86	1919.12	2075.29
Ni	5.83	2.88	13.91	2.74	52.85
P	11,601.69	38,669.80	10,088.65	20,852.79	19,535.28
Pb	ND	ND	ND	ND	14.00
Sb	ND	ND	ND	ND	ND
Se	ND	ND	ND	ND	ND
Si	1696.34	838.14	1532.26	1832.79	1668.00
Sn	149.81	65.08	43.62	52.53	84.18
Sr	480.26	1091.17	918.19	2151.38	405.38
Tl	ND	ND	ND	ND	ND
V	12.64	<0.05	20.04	<0.05	8.90
Zn	290.45	274.54	636.20	422.88	302.4

Note: All units are in ppm.

From a statistical perspective, the chemical components that showed the most notable and consistent concentrations among the samples were Ca, K, and Mg, which constitute the predominant mineral fraction. In this case, Ca also reached the highest concentrations recorded within the set of analyzed samples, ranging approximately between 114,902 and 234,890 ppm. This confirms that it is the main inorganic constituent of the ash. This behavior was consistently observed across all the samples evaluated, regardless of the type

of residue, suggesting low relative variability and a strong association of Ca with the plant structure of the residues.

The elemental composition of the ash observed in this study is consistent with that reported for lignocellulosic biomass used for energy purposes, particularly forest residues, agricultural residues, and natural grasses. The high proportion of calcium, potassium, and magnesium is a distinctive feature with direct implications for both combustion efficiency and potential operational issues. The elevated calcium content is especially relevant, as this element contributes to increasing ash melting temperature and may act as a stabilizing agent, reducing the tendency for slag formation. Several recent studies have indicated that Ca-rich biomasses exhibit more favorable behavior during combustion and gasification by minimizing sintering and fouling phenomena in thermal systems [78–80].

Potassium also showed high concentrations, ranging from 44,154 ppm to 193,950 ppm, with notable variability among samples. This variability may be explained by differences in biomass type among species, different degrees of leaching prior to analysis, and the biological phenotype of the plant tissue. In this regard, the literature reports that potassium, although considered a key element from the plant's biochemical perspective, is also a determining factor for energy utilization. A high potassium content favors the formation of low-melting alkaline compounds, increasing the likelihood of slagging, high-temperature corrosion, and deposit formation on metal surfaces. However, the presence of high levels of calcium and magnesium may partially mitigate these issues by promoting the formation of more stable silicates and phosphates, as reported in recent studies on forest biomass ash [81,82].

Magnesium, in turn, exhibited intermediate to high concentrations, within an approximate range of 33,442 ppm to 55,147 ppm, confirming its importance as a stable element in the inorganic fraction. Therefore, magnesium can be considered to reinforce the role of calcium in modifying the physicochemical properties of ash, contributing not only to greater thermal stability but also to reducing the formation of low-melting phases. Moreover, the Ca–Mg ratio observed in the analyzed samples is considered suitable for conventional energy applications, particularly in fixed-bed and fluidized-bed combustion systems [83,84].

Phosphorus (P) was another major element found in relevant proportions, reaching up to 38,669 ppm, while sodium (Na) remained within a lower range (maximum values on the order of 2873 ppm). Iron (Fe), on the other hand, varied considerably, showing an approximate range of 1044–8760 ppm, reflecting its dependence on edaphic factors and mineral contamination. Moderate concentrations of iron and manganese may be beneficial for ash reactivity due to their catalytic potential in oxidation and gasification reactions of residual carbon. Recently, it has been demonstrated that controlling Fe and Mn levels can improve ash combustion kinetics without significant undesirable effects [85,86].

Regarding transition elements and trace metals, moderate concentrations of manganese (Mn), aluminum (Al), barium (Ba), and zinc (Zn) were identified. Manganese contents ranged between 394 and 2404 ppm, while both aluminum and barium showed concentrations above 1500 ppm in different samples. Zinc was present in all analyzed samples, although at relatively low concentrations ($\approx$ 270–636 ppm).

In contrast, potentially toxic elements such as arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), cobalt (Co), antimony (Sb), and thallium (Tl) showed null concentrations or values below the detection limit (ND) in most samples, representing a positive outcome from an environmental standpoint.

From an environmental perspective, the scarce or non-existent presence of toxic heavy metals is one of the most significant findings derived from the microanalyses. The low levels of As, Cd, Pb, and Sb considerably reduce the likelihood of pollutant emissions during combustion and significantly increase the potential for ash valorization, for example, as

mineral amendments or secondary materials, provided that regulatory requirements are properly met.

The presence of phosphorus and sodium, although in moderate amounts, must also be carefully evaluated. Phosphorus may promote the formation of complex molten phases when interacting with potassium and calcium, while sodium is strongly correlated with high-temperature corrosion phenomena. These aspects suggest the potential implementation of ash management strategies such as fuel blending, biomass pretreatment, or control of operating conditions.

Finally, the results confirm that the analyzed biomasses are viable for energy applications, based on their mineral structure dominated by Ca, K, and Mg, clearly evident and easily inferred, with lower presence of Fe, Na, and P and only trace amounts of heavy metals. This behavior is consistent with that reported for agricultural and forest biomasses and reinforces their viability as an energy resource when appropriate ash management techniques and strategies to address fouling and corrosion problems in thermal systems are implemented.

3.5. Elementary Analysis

The elemental analysis performed on the five biomass samples studied is shown in Table 5: pine branches, cherry branches, cherry leaves, grass, and huinumo. The results are presented as percentages on a dry matter basis. The elemental analysis includes carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulfur content.

Table 5. Results of elemental analysis (C, H, O, N, S) of biomass samples.

Sample	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Oxygen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)
Pine branches	48.29 (± 0.79)	5.86 (± 0.43)	45.46 (± 0.67)	0.37 (± 0.34)	nd
Huinumo	49.79 (± 0.40)	6.03 (± 0.56)	43.50 (± 0.60)	0.67 (± 0.40)	nd
Cherry branches	45.81 (± 0.53)	5.89 (± 0.55)	46.84 (± 0.55)	1.45 (± 0.53)	nd
Cherry leaves	47.55 (± 0.89)	6.36 (± 0.52)	42.49 (± 0.65)	3.58 (± 0.45)	nd
Grass	42.81 (± 0.34)	5.70 (± 0.50)	50.23 (± 0.50)	1.24 (± 0.54)	nd

Table 5 shows that the maximum carbon content was 49.79% in huinumo, while the minimum was 42.81% in grass. Hydrogen was found within a relatively narrow range (5.70–6.36%), consistent with values reported for lignocellulosic biomass in the literature (e.g., hydrogen contents between 6 and 9% in other lignocellulosic residues) [87]. Oxygen, calculated by difference, reached its highest value in grass (50.23%) and lowest in cherry leaves (42.49%). Nitrogen, always below 4%, was notably higher in cherry leaves (3.58%) than in the other samples. Sulfur was not detected in any of the analyzed biomass samples, which is favorable for reducing sulfur oxide emissions that are precursors to the formation of sulfuric compounds and hydrogen sulfide in the atmosphere (typical sulfur content in biomass is usually <0.05% or close to zero) [88,89].

From a statistical perspective, carbon content had a mean of 46.85% (± 0.59), while hydrogen averaged 5.99% (± 0.26). Oxygen showed greater variability ($SD \approx 3.06$), reflecting intrinsic differences in the composition of the different plant matrices studied.

The elemental composition of biomass is a preliminary indicator of solid biofuel quality and energy potential, particularly in thermochemical conversion processes.

Carbon at low moisture levels is the main factor determining the energy content of solid fuels. A higher carbon content is associated with higher HHVs. The exothermic oxidation reaction of carbon enables heat release and its subsequent utilization [90]. In this regard, the carbon content of huinumo (49.8%) and pine branches (48.3%) is associated with relatively high energy potential compared to grass (42.8%), and is similar to what has been reported for forest biomass versus herbaceous biomass [91].

Hydrogen, although present in lower proportions than carbon, also contributes significantly to calorific value, as its oxidation produces water and releases additional energy per unit mass oxidized. The hydrogen contents found (5.7–6.4%) fall within typical ranges reported for lignocellulosic biomass in recent comparative analyses [92].

Similarly, oxygen content is inversely related to calorific value. A higher oxygen fraction implies a greater proportion of partially oxidized compounds and therefore lower available energy potential [93]. In the present results, samples with higher oxygen content (grass) are associated with lower theoretical HHVs. Nitrogen, although present at low levels (<4%), is relevant because during combustion at temperatures near 1000 °C with excess air, it may contribute to the formation of nitrogen oxides (NO_x), which are associated with environmental impacts and act as precursors to other pollutants [94]. If a higher nitrogen content is present in cherry leaves, strategies should be implemented to reduce its presence and prevent NO_x emissions during combustion processes.

Finally, sulfur was not detected (nd) in any of the samples, implying negligible formation of sulfur oxides (SO_x) compared to fossil fuels [95].

Overall, the elemental composition indicates that the forest samples (Pine branches and Huinumo) exhibit a more favorable profile for direct thermal energy applications compared to grass, due to higher carbon and lower oxygen contents. Although nitrogen levels are low, they should still be considered in environmental assessments. The results obtained show trends similar to those reported in recent scientific literature regarding elemental composition, calorific value, and biomass quality.

3.6. Multi-Criteria Analysis

For this analysis, energy, proximate, and chemical composition parameters were considered, generating quantifiable indicators, as shown in Table 6.

Table 6. Parameters and indicators used in the multi-criteria analysis.

Parameter	Indicator
Energy	Calorific value (MJ/kg)
	Lignin content (%)
	Extractive content (%)
Proximate	Volatile matter (%)
Chemical composition	Potassium (ppm)
	Carbon (%)

The weighting using maximum and minimum values defines the best- and worst-case scenarios. The maximum reference values were obtained from the scientific literature, as shown in Table 7. A value of zero was assigned to the lower limit of all indicators, establishing it as the absolute baseline for comparison.

Table 7. Indicators and maximum and minimum values.

Indicator	Maximum Value
Calorific value (MJ/kg)	20.92 [96]
Lignin content (%)	53.3 [97]
Extractive content (%)	55.9 [98]
Potassium (ppm)	150,000 [99]
Volatile matter (%)	98 [100]
Carbon (%)	80.7 [101]

The multi-criteria analysis methodology applied in this study does not constitute a standalone approach; rather, it gains validity within a comparative framework in which the evaluated materials are analyzed holistically and systematically. Under these conditions, multi-criteria analysis proves useful as a robust tool for integrating and weighting multiple variables, enabling a comprehensive assessment of the energy potential of the lignocellulosic residues studied.

Six indicators directly affecting the quality and feasibility of solid biofuel production were considered: calorific value (MJ/kg), lignin content (%), extractive content (%), potassium content (ppm), volatile matter content (%), and carbon content (%). These indicators were selected due to their relevance in thermal conversion processes and their influence on combustion efficiency, thermal stability, and overall energy performance [43].

The multicriteria evaluation was carried out using the biomass samples analyzed in the present study. The simultaneous comparison of these materials allowed the identification of significant differences in their energy potential, as well as the establishment of relative indicators for the analyzed samples.

The multicriteria analysis data are presented in Table 8. The highest reliability, viability, and effectiveness of the analyzed lignocellulosic residues were determined from an energy perspective for the production and use of solid biofuels.

Table 8. Actual values of the results for each indicator of the biomass samples.

Indicator	Pine Branches Actual Value	Huinumo Actual Value	Cherry Branches Actual Value	Cherry Leaves Actual Value	Grass Actual Value
Calorific value (MJ/kg)	19.53	20.73	19.11	20.66	17.28
Lignin content (%)	24.03	17.9	16.02	19.04	3.72
Extractive content (%)	32.03	49.47	35.88	53.2	35.25
Volatile matter (%)	82.45	77.56	81.18	79.88	78.24
Potassium (ppm)	10,088.65	11,601.69	20,852.79	38,669.8	19,535.28
Carbon (%)	48.29	49.79	45.81	47.55	42.81

To perform a homogeneous comparison, the values in Table 8 were normalized, resulting in a standardized scale from 0 to 10 (0 represents the least favorable scenario, and 10 the most favorable scenario). The normalized values are shown in Table 9.

Table 9. Normalized values of the parameters of the multicriteria analysis.

Indicator	Pine Branches	Huinumo	Cherry Branches	Cherry Leaves	Grass	Ideal Case
Calorific value (MJ/kg)	9.33	9.90	9.13	9.87	8.26	10
Lignin content (%)	4.50	3.35	3.00	3.57	0.69	10
Extractive content (%)	5.72	8.84	6.41	9.51	6.30	10
Volatile matter (%)	8.41	7.91	8.28	8.15	7.98	10
Potassium (ppm)	0.67	0.77	1.39	2.57	1.30	10
Carbon (%)	5.87	6.05	5.57	5.78	5.20	10

Figure 2 graphically organizes the information from the multi-criteria analysis using an amoeba diagram.

Based on the multi-criteria analysis methodology, the results presented in Figure 2 allow for a homogeneous comparison among the different lignocellulosic residues evaluated for energy purposes and solid biofuel production. The selected indicators were physical and chemical parameters on a normalized scale from 0 to 10.

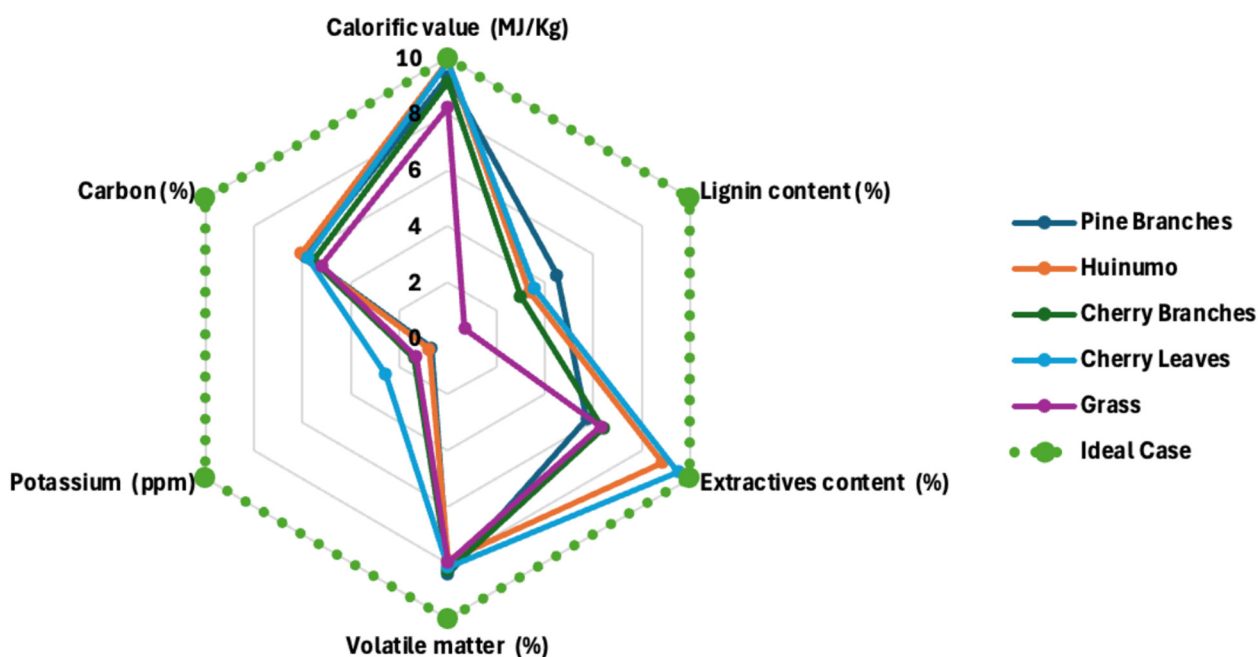


Figure 2. Formulation of the multi-criteria analysis.

Regarding calorific value, all evaluated materials obtained high values close to the ideal case, with huinumo ($=9.90$) and cherry leaves ($=9.87$) standing out, reflecting high intrinsic energy potential. Pine branches ($RP = 9.33$) and cherry branches ($=9.13$), although showing good performance, exhibited slightly lower calorific values. As for grass ($=8.26$), although its value is lower, it remains competitive. This behavior confirms that, under a purely energy-based approach, most of the evaluated biomasses are viable for conversion into solid biofuels.

With respect to lignin content, a key indicator due to its contribution to calorific value and the mechanical stability of briquettes or pellets, pine branches ($=4.50$) showed the best relative performance, followed by cherry leaves ($=3.57$) and huinumo ($=3.35$). In contrast, grass presented the lowest value ($=0.69$), highlighting structural and energetic limitations that could restrict solid biofuel quality if not blended with biomass containing higher lignin content.

In terms of extractive content, greater differentiation among materials was observed. Cherry leaves exhibited the highest value ($=9.51$), followed by huinumo ($=8.84$). From an energy perspective, these results appear outstanding due to the high energy density of extractives. However, within the multi-criteria framework, this parameter must be carefully evaluated, as a high extractive content may also be associated with operational challenges during combustion, including increased generation of volatile compounds. Regarding volatile matter content, all materials showed relatively high and homogeneous values (7.91 – 8.41), facilitating ignition and combustion. Pine branches ($=8.41$) and cherry branches ($=8.28$) stand out slightly, which is favorable for ignition and initial combustion processes in bioenergy systems.

Considering potassium content, normalized under the same comparative criteria, low values were obtained in all cases, particularly for pine branches ($=0.67$) and huinumo ($H = 0.77$). From an energy perspective, this is important, since high potassium concentrations are generally associated with slagging, corrosion, and fouling in combustion facilities. Consequently, the low values indicate a technical advantage for solid biofuels.

Finally, carbon content showed intermediate and relatively close values among the studied materials, with huinumo ($=6.05$) and pine branches ($=5.89$) standing out. This

behavior supports the consistency observed in calorific value, as carbon is one of the main determinants of biomass energy content.

The multi-criteria analysis indicates that there is no single optimal material across all indicators; however, the results allow for a comparative assessment of the strengths and weaknesses of the different biomass types. Pine branches and huinumo exhibit balanced performance in terms of calorific value, lignin, volatile matter, and potassium, and can therefore be considered technically robust alternatives for solid biofuel production. Cherry leaves present a significant proportion of extractives and high calorific value. Grass, although limited in lignin and carbon content, may be considered viable under blending or co-processing schemes.

Finally, the normalized results demonstrate the applicability of multi-criteria analysis as a decision-support tool for the energy valorization of biomass types, considering a balance between performance, chemical composition, and technical feasibility for the production of densified solid biofuels.

4. Conclusions

The woody and plant biomass residues generated in the locality of San Francisco Pichátaro, Michoacán, show potential for valorization in the production of densified solid biofuels (briquettes and/or pellets), exhibiting high potential at both technical and energy levels. Based on physical, chemical, proximate, elemental, and microanalytical characterization, it has been validated that these lignocellulosic residues can be considered a feasible alternative for bioenergy generation, as well as for sustainable waste management.

The results obtained demonstrate that materials such as huinumo, pine branches, and cherry leaves possess optimal energy properties, characterized by high calorific values (19–21 MJ/kg), low moisture and ash contents, and elemental compositions dominated by carbon with low sulfur content. These characteristics are key to achieving efficient, stable combustion with reduced environmental impact. Specifically, huinumo and pine branches exhibited balanced behavior among carbon, lignin, and volatile matter contents, highlighting them as strategic feedstocks for the production of high-quality densified solid biofuels.

The basic chemical analysis revealed that the structural fractions of cellulose, hemicellulose, and lignin directly influence the thermochemical behavior of each biomass, while the high proportion of extractives (particularly in cherry leaves and huinumo) provides additional energy density, although it requires appropriate operational management during combustion. The ash microanalysis confirmed a low presence of toxic heavy metals, supporting the environmental viability of energy utilization and opening the possibility for secondary ash valorization under regulatory criteria.

The multi-criteria analysis, through the use of normalized energy, chemical, and elemental indicators, enabled a homogeneous comparison among the different residues analyzed, demonstrating that there is no absolute optimal material; however, more balanced combinations can be achieved from a technical and energy perspective. Pine branches and huinumo stand out as the most robust alternatives, while materials such as grass can be efficiently integrated through blending or co-processing schemes.

The results support the energy utilization of forest and plant residues as a tool for energy recovery, contributing to the energy transition, the circular economy, and the mitigation of environmental impacts, fostering the development of local, sustainable, and socially relevant solutions in rural territories.

Author Contributions: Conceptualization, M.M.-M.; Methodology, M.M.-M., R.G.-M., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Software, M.M.-M. and V.M.R.-G.; Validation, M.M.-M., R.G.-M., J.G.R.-Q., J.C.C.-H., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Formal analysis, M.M.-M., R.G.-M., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.;

Investigation, M.M.-M. and L.F.P.-I.; Resources, M.M.-M., R.G.-M., J.G.R.-Q., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Data curation, M.M.-M., R.G.-M., J.G.R.-Q., J.C.C.-H., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Writing—original draft, M.M.-M.; Writing—review & editing, M.M.-M., J.G.R.-Q. and V.M.R.-G.; Visualization, M.M.-M., R.G.-M., J.G.R.-Q., J.C.C.-H., L.F.P.-I. and V.M.R.-G.; Supervision, M.M.-M., J.G.R.-Q., J.C.C.-H., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Project administration, M.M.-M., R.G.-M., J.G.R.-Q., J.C.C.-H., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G.; Funding acquisition, R.G.-M., J.C.C.-H., L.F.P.-I., L.B.L.-S. and V.M.R.-G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The author also thanks the Teacher Professional Development Program (PRODEP-2025), and the Intercultural Indigenous University of Michoacán for their support in carrying out this research, as well as the Postdoctoral Scholarship Program for Mexico, by the Secretariat of Science, Humanities, Technology and Innovation of the Government of Mexico (SECIHTI).

Data Availability Statement: The data presented in this study are available upon request to the corresponding author.

Acknowledgments: Special thanks to the Laboratorio de Innovación y Evaluación de la Bioenergía (LINEB) and the Laboratorio Nacional de Biocombustibles Sólidos (BIOENER) “Apoyo LNC-2023-40” for their support in carrying out this study. We also acknowledge the Colegio de Bachilleres, San Francisco Pichátaro Campus, Michoacán, Mexico, for its valuable contribution.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Morales-Máximo, M.; Rutiaga-Quñones, J.G.; Masera, O.; Ruiz-García, V.M. Briquettes from *Pinus* spp. Residues: Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies* **2022**, *15*, 3419. [CrossRef]
2. Mignogna, D.; Szabó, M.; Ceci, P.; Avino, P.; Mignogna, D.; Szabó, M.; Ceci, P.; Avino, P. Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability* **2024**, *16*, 7036. [CrossRef]
3. Kansara, S.; Rezanejad, K.; Jahanbakht, M.; Santos, D.M.F.; Kansara, S.; Rezanejad, K.; Jahanbakht, M.; Santos, D.M.F. Evaluating Techno-Economic Feasibility of Green Hydrogen Production Integrated with a Wave Energy Converter Device. *Fuels* **2025**, *6*, 92. [CrossRef]
4. Sorooshian, S. The Sustainable Development Goals of the United Nations: A Comparative Midterm Research Review. *J. Clean. Prod.* **2024**, *453*, 142272. [CrossRef]
5. López-Sosa, L.B.; Santibáñez-Rocha, G.A.; Morales-Máximo, M.; González-Carabes, R.; Rutiaga-Quñones, J.G.; Bustamante, C.A.G.; Pintor-Ibarra, L.F.; Ramos, I.S.; Reyes, C.I.V.; del Carmen Rodríguez Magallón, M.; et al. Evaluation of the Energy Potential of Agro-Industrial Waste from *Mangifera indica* L. in Zamora, Mexico: Perspectives for the Management of Solid and Liquid Biofuels. *BioEnergy Res.* **2024**, *17*, 2127–2140. [CrossRef]
6. Castillo-Tera, O.A.; López-Sosa, L.B.; Pintor-Ibarra, L.F.; Rutiaga-Quñones, J.G.; Morales-Máximo, M. Evaluation of *Bursera cuneata* Schltdl. Wood Residues for Use as Densified Biofuels. *Results Eng.* **2025**, *26*, 104916. [CrossRef]
7. Sever, S.D.; Tok, E.; Sellami, A.L.; Sever, S.D.; Tok, E.; Sellami, A.L. Sustainable Development Goals in a Transforming World: Understanding the Dynamics of Localization. *Sustainability* **2025**, *17*, 2763. [CrossRef]
8. Zlateva, P.; Terziev, A.; Murzova, M.; Mileva, N.M.; Zlateva, P.; Terziev, A.; Murzova, M.; Mileva, N.M. Research on the Efficiency of Solid Biomass Fuels and Consumer Preferences in Bulgaria. *Fuels* **2025**, *6*, 17. [CrossRef]
9. Amjith, L.; Bavanish, B. A Review on Biomass and Wind as Renewable Energy for Sustainable Environment. *Chemosphere* **2022**, *293*, 133579. [CrossRef]
10. Nunes, L.J.R.; Casau, M.; Matias, J.C.O.; Dias, M.F.; Nunes, L.J.R.; Casau, M.; Matias, J.C.O.; Dias, M.F. Assessment of Woody Residual Biomass Generation Capacity in the Central Region of Portugal: Analysis of the Power Production Potential. *Land* **2022**, *11*, 1722. [CrossRef]
11. Olabisi, A.S.; Balogun, A.O.; Oni, T.O.; Fakinle, B.S.; Sotoudehnia, F.; McDonald, A.G.; Ikubanni, P.P. Physicochemical Characterization of Woody Lignocellulosic Biomass and Charcoal for Bio-Energy Heat Generation. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 19242. [CrossRef]
12. Ruiz-García, V.; Medina, P.; Vázquez, J.; Villanueva, D.; Ramos, S.; Masera, O. Bioenergy Devices: Energy and Emissions Performance for the Residential and Industrial Sectors in Mexico. *BioEnergy Res.* **2021**, *15*, 1764–1776. [CrossRef]
13. Saravanan, A.; Ragini, Y.P.; Karishma, S.; Hemavathy, R.V.; Jyotsna, M. A Review on Advancing Sustainable Energy: The Role of Biomass and Bioenergy in a Circular Economy. *Sustain. Futures* **2025**, *10*, 100835. [CrossRef]
14. Ahmed, N.; Banjare, M.K.; Singh, S.B.; Khan, A.B.; Sharma, K.N.; Behera, K. Biomass Wastes for Bioenergy-Based Applications. In *Biomass Wastes for Sustainable Industrial Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2024; ISBN 978-1-003-46683-3.

15. Bianchini, L.; Colantoni, A.; Venanzi, R.; Cozzolino, L.; Picchio, R. Physicochemical Properties of Forest Wood Biomass for Bioenergy Application: A Review. *Forests* **2025**, *16*, 702. [\[CrossRef\]](#)
16. Papa, K.; Lavarias, J.; Denson, M.; Paragas, D.; Tanquilut, M.R.; Morico, A.; Papa, K.; Lavarias, J.; Denson, M.; Paragas, D.; et al. Characterization, Kinetic Studies, and Thermodynamic Analysis of Pili (*Canarium ovatum* Engl.) Nutshell for Assessing Its Biofuel Potential and Bioenergy Applications. *Fuels* **2025**, *7*, 2. [\[CrossRef\]](#)
17. Uzoagba, C.E.J.; Okoroigwe, E.; Kadivar, M.; Anye, V.C.; Bello, A.; Ezealigo, U.; Odette Ngasoh, F.; Pereira, H.; Azikiwe Onwualu, P. Characterization of Wood, Leaves, Barks, and Pod Wastes from *Prosopis africana* Biomass for Biofuel Production. *Waste Manag. Bull.* **2024**, *2*, 172–182. [\[CrossRef\]](#)
18. Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quiñones, J.G.; Alcaraz-Vera, J.V.; Ávalos-Rodríguez, M.L.; Moreno-Anguiano, O. Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis Laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods. *Molecules* **2024**, *29*, 2587. [\[CrossRef\]](#)
19. Burhenne, L.; Messmer, J.; Aicher, T.; Laborie, M.-P. The Effect of the Biomass Components Lignin, Cellulose and Hemicellulose on TGA and Fixed Bed Pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2013**, *101*, 177–184. [\[CrossRef\]](#)
20. Flores, J.J.A.; Ibarra, L.F.P.; Zetina, F.D.M.; Quiñones, J.G.R.; Vera, J.V.A.; Rodríguez, M.L.Á.; Flores, J.J.A.; Ibarra, L.F.P.; Zetina, F.D.M.; Quiñones, J.G.R.; et al. Pyrolysis and Physicochemical, Thermokinetic and Thermodynamic Analyses of *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt and Baker Waste to Evaluate Its Bioenergy Potential. *Molecules* **2024**, *29*, 4388. [\[CrossRef\]](#)
21. Ruiz-Aquino, F.; Feria-Reyes, R.; Santiago-García, W.; Suárez-Mota, M.E.; Mijangos-Ricárdez, Ó.F.; Pérez-Ramos, A.E.; Rutiaga-Quiñones, J.G. Effect of Chemical Components on the Energy Properties of Wood from Two Forest Species. *Results Eng.* **2025**, *28*, 107816. [\[CrossRef\]](#)
22. Morales-Máximo, M.; Ruíz-García, V.M.; Rutiaga-Quiñones, J.G.; López-Sosa, L.B. Design and Implementation of a Low-Pressure Briquetting Machine for the Use of *Pinus* spp. Wood Residues: An Approach to Appropriate Rural Technology. *Clean Technol.* **2025**, *7*, 22. [\[CrossRef\]](#)
23. Zlateva, P.; Terziev, A.; Murzova, M.; Mileva, N.; Vassilev, M. Market Research on Waste Biomass Material for Combined Energy Production in Bulgaria: A Path Toward Enhanced Energy Efficiency. *Energies* **2025**, *18*, 4153. [\[CrossRef\]](#)
24. Klingenberg, D.; Nolasco, A.M.; Júnior, A.F.D.; Candaten, L.; Cavalcante, A.K.L.; de Souza, E.C. Energy Potential of Wood Waste from a Tropical Urban Forest. *Res. Soc. Dev.* **2020**, *9*, e451997478. [\[CrossRef\]](#)
25. Mendoza, P.C.M.; Ortega, A.M.; Morales, A.B. Eficiencia de combustión y emisiones de CO/NOX determinadas mediante simulaciones numéricas para una estufa eficiente de biomasa: Efecto de la relación del exceso de aire. *Tend. Energ. Renov. Sustentabilidad* **2023**, *2*, 1–2.
26. Bermúdez, J.M.S.; Varela, G.A.Z.; Cedeño, R.E.C.; Riera, M.A. Estudio de residuos biomásicos agrícolas para la instalación de una biorrefinería de pequeña escala. *Granja Rev. Cienc. Vida* **2025**, *42*, 136–153.
27. Silva, D.A.L.; Filleti, R.A.P.; Musule, R.; Matheus, T.T.; Freire, F.M.C.S. A Systematic Review and Life Cycle Assessment of Biomass Pellets and Briquettes Production in Latin America. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *157*, 112042. [\[CrossRef\]](#)
28. Elniski, A.; Bujanovic, B.M.; Elniski, A.; Bujanovic, B.M. Effect of Hot Water Extraction of Lignocellulosic Biomass on Fuel Pellet Properties. *Fuels* **2025**, *6*, 74. [\[CrossRef\]](#)
29. Morales-Máximo, M.; Ruíz-García, V.M.; López-Sosa, L.B.; Rutiaga-Quiñones, J.G. Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 2933. [\[CrossRef\]](#)
30. Korol, N.; Yankovych, V.; Korol, N.; Yankovych, V. Polyvinyl Alcohol-Based Binder Systems for Biomass and Charcoal Briquettes. *Fuels* **2025**, *6*, 81. [\[CrossRef\]](#)
31. de los Ángeles Álvarez-Ayala, M.; Martínez-Cinco, M.A.; Gutierrez-Antonio, C.; Ruiz-García, V.M. Producción de briquetas a partir de residuos biomásicos. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **2024**, *40*, 41–51. [\[CrossRef\]](#)
32. López-Sosa, L.B.; Morales-Máximo, M.; Rutiaga-Quiñones, J.; Aguilera-Mandujano, A. Chapter 7—Methodology for the Evaluation of the Potential of Solid Biofuels, Their Environmental Impacts, and Applications in End-Use Technologies in Developing Countries. In *Biofuels and Sustainability*; Zhu, D., Dar, M.A., Shahnawaz, M., Eds.; Woodhead Series in Bioenergy; Elsevier Science Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2025; pp. 105–118, ISBN 978-0-443-21433-2.
33. López Sosa, L.B.; Morales-Máximo, M.; Mandujano, A.A.; Justo, B.A.; Cárabes, R.G.; Lázaro, N.F. Methodological Proposal for the Evaluation of the Sustainability of Solid Biofuels. In *Advanced Biofuels and Circular Economy: Technoeconomic, Socioeconomic, and Environmental Implications*; Akhtar Usmani, R., Dar, M.A., Khan, A.A., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2025; pp. 411–431, ISBN 978-3-031-86934-1.
34. UNE-EN 14774-1; Biocombustibles Sólidos. Determinación Del Contenido de Humedad. In Parte 1: Humedad Total. UNE: Madrid, Spain, 2010; p. 10.
35. ASTM E872-82; A.I.W.C. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2013.

36. Rutiaga-Quiñones, J.G.; Pintor-Ibarra, L.F.; Orihuela-Equihua, R.; González-Ortega, N.; Ramírez-Ramírez, A.; Carrillo-Parra, A.; Carrillo-Ávila, N.; Navarrete-García, M.A.; Ruíz-Aquino, F.; Rangel-Mendez, J.R.; et al. Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources* **2020**, *15*, 8529–8553. [\[CrossRef\]](#)
37. UNE-EN 14775; Biocombustibles Sólidos. In Método para la Determinación del Contenido de Cenizas. Asociación Española de Normalización y Certificación, Ed. UNE: Madrid, Spain, 2010; p. 10.
38. Bhatt, B.P.; Todaria, N.P. Fuelwood Characteristics of Some Mountain Trees and Shrubs. *Biomass* **1990**, *21*, 233–238. [\[CrossRef\]](#)
39. Kan, T.; Strezov, V.; Evans, T. Effect of the Heating Rate on the Thermochemical Behavior and Biofuel Properties of Sewage Sludge Pyrolysis. *Energy Fuels* **2016**, *30*, 1564–1570. [\[CrossRef\]](#)
40. Morales, C.N.; López-Sosa, L.B.; Rutiaga-Quiñones, J.G.; Corral-Huacuz, J.C.; Aguilera-Mandujano, A.; Pintor-Ibarra, L.F.; López-Miranda, A.; Delgado-Domínguez, S.N.; Rodríguez-Magallón, M.d.C.; Morales-Máximo, M. Characterization of Agricultural Residues of Zea Mays for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies* **2022**, *15*, 6870. [\[CrossRef\]](#)
41. López-Sosa, L.B.; Morales-Máximo, M. *Manual de Principios Sobre Vinculación, Innovación y Diseño Para El Desarrollo de Proyectos Ecotecnológicos*, 1st ed.; Millán-Ramírez, A., Ed.; Universidad Intercultural Indígena de Michoacán: Pátzcuaro Michoacán, Mexico, 2022; ISBN 978-607-9386-01-6.
42. López-Sosa, L.B.; Oseguera-Rivera, A.Y.; Morales-Máximo, M.; Corral-Huacuz, J.C.; Valdespino, J.C.L.; Rodríguez-Torres, G.M.; Rivero, M.; García, C.A.; Orozco, S. Multivariate Analysis of Materials Used in Rural Housing in Mexico Considering Sustainability Indicators: Towards Suitable House Construction. *Results Eng.* **2025**, *25*, 103744. [\[CrossRef\]](#)
43. Morales-Máximo, M.; Rutiaga-Quiñones, J.G. Analysis and Utilization of Lignocellulosic Materials for the Generation of Solid Biofuels from the Purépecha Plateau in the State of Michoacán, Mexico. *Results Eng.* **2025**, *26*, 105230. [\[CrossRef\]](#)
44. Toro, E.C.; Pai, N.N.; Abahonza, E.H.D. El compostaje y el manejo de los Residuos Sólidos Orgánicos para mantener un entorno saludable en la Institución Educativa Técnica Agropecuaria Ambiental Bilingüe Inda Sabaleta. *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* **2023**, *7*, 4188–4205. [\[CrossRef\]](#)
45. McKendry, P. Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresour. Technol.* **2002**, *83*, 37–46. [\[CrossRef\]](#)
46. Aal, A.M.K.A.; Ibrahim, O.H.M.; Al-Farga, A.; Saeidy, E.A.E.; Aal, A.M.K.A.; Ibrahim, O.H.M.; Al-Farga, A.; Saeidy, E.A.E. Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled Ficus Nitida Pruning Residuals. *Sustainability* **2023**, *15*, 11762. [\[CrossRef\]](#)
47. Klinger, J.; Westover, T.; Saha, N.; Sibbett, C.; Williams, C.L. Thermal Properties of Native and Densified Hardwood, Softwoods, and Agricultural Residue. *Biomass Bioenergy* **2025**, *195*, 107711. [\[CrossRef\]](#)
48. Saeed, A.A.H.; Harun, N.Y.; Bilad, M.R.; Afzal, M.T.; Parvez, A.M.; Roslan, F.A.S.; Rahim, S.A.; Vinayagam, V.D.; Afolabi, H.K.; Saeed, A.A.H.; et al. Moisture Content Impact on Properties of Briquette Produced from Rice Husk Waste. *Sustainability* **2021**, *13*, 3069. [\[CrossRef\]](#)
49. Zhao, G.; Li, K.; Cui, F.; Yao, S.; Zhang, Y.; Sun, Z. Moisture Migration and Drying Mechanisms of Coal Slime Under Hot-Air and Steam Flash Drying. *Separations* **2026**, *13*, 88. [\[CrossRef\]](#)
50. Chen, X.; Yan, H.; Ma, L.; Fang, Q.; Deng, S.; Wang, X.; Yin, C. Moisture Content Effects on Self-Heating in Stored Biomass: An Experimental Study. *Energy* **2023**, *285*, 129391. [\[CrossRef\]](#)
51. Fu, Z.; Chen, J.; Zhang, Y.; Xie, F.; Lu, Y. Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers* **2023**, *15*, 3295. [\[CrossRef\]](#)
52. Teixeira, B.M.M.; Oliveira, M.; da Silva Borges, A.D. Coniferous Biomass for Energy Valorization: A Thermo-Chemical Properties Analysis. *Sustainability* **2024**, *16*, 7622. [\[CrossRef\]](#)
53. Silva Da Silva, W.D.; Santos, J.X.D.; Nisgoski, S.; Naide Acosta, T.L.; Vieira, H.C.; Souza, D.V.; Dalla Corte, A.P.; Brand, M.A.; Muñiz, G.I.B.D. Density, Chemistry and Energy Potential of Wood Waste from Five Least Explored Amazonian Species: Contribution to a Circular Bioeconomy. *Wood Mater. Sci. Eng.* **2025**, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
54. Vassilev, S.V.; Baxter, D.; Andersen, L.K.; Vassileva, C.G. An Overview of the Chemical Composition of Biomass. *Fuel* **2010**, *89*, 913–933. [\[CrossRef\]](#)
55. Ventura Ríos, J.V.R.; Santiago Ortega, M.A.; Barrera Martinez, I.D.C.; Álvarez Vázquez, P.; Carrillo López, P.; Honorato Salazar, J.A. Caracterización del pasto mombaza como materia prima para producir bioetanol. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* **2021**, *12*, 235–246. [\[CrossRef\]](#)
56. Wyszowska, J.; Boros-Lajszner, E.; Kucharski, J.; Wyszowska, J.; Boros-Lajszner, E.; Kucharski, J. Calorific Value of Festuca Rubra Biomass in the Phytostabilization of Soil Contaminated with Nickel, Cobalt and Cadmium Which Disrupt the Microbiological and Biochemical Properties of Soil. *Energies* **2022**, *15*, 3445. [\[CrossRef\]](#)
57. Saidur, R.; Abdelaziz, E.A.; Demirbas, A.; Hossain, M.S.; Mekhilef, S. A Review on Biomass as a Fuel for Boilers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 2262–2289. [\[CrossRef\]](#)
58. Sulg, M.; Konist, A.; Järvik, O. Characterization of Different Wood Species as Potential Feedstocks for Gasification. *Agron. Res.* **2021**, *19*, 276–299. [\[CrossRef\]](#)

59. Hurisa, G.; Yimer, L.; Amante, M. Species Composition and Burden of Small Intestinal Parasitic Helminth in Goats and Sheep Slaughtered at Bishoftu Elfora Export Abattoir (Ethiopia). *Vet. Med. Res. Rep.* **2021**, *12*, 235–239. [\[CrossRef\]](#)
60. Tan, F.; He, L.; Zhu, Q.; Wang, Y.; Hu, G.; He, M. Characterization of Different Types of Agricultural Biomass and Assessment of Their Potential for Energy Production in China. *BioResources* **2019**, *14*, 6447–6464. [\[CrossRef\]](#)
61. Sobol, Ł.; Wolski, K.; Radkowski, A.; Piwowarczyk, E.; Jurkowski, M.; Bujak, H.; Dyjakon, A.; Sobol, Ł.; Wolski, K.; Radkowski, A.; et al. Determination of Energy Parameters and Their Variability between Varieties of Fodder and Turf Grasses. *Sustainability* **2022**, *14*, 11369. [\[CrossRef\]](#)
62. Salcedo-Puerto, O.; Mendoza-Martinez, C.; de Paula Protásio, T.; Vakkilainen, E. Solid Biofuel Generation from Eucalyptus Wood Residues: An Experimental Comparison Study of Torrefaction, Hydrothermal, and Slow Pyrolysis. *Renew. Energy* **2026**, *263*, 125545. [\[CrossRef\]](#)
63. Amaral, S.S.; de Carvalho Junior, J.A.; Costa, M.A.M.; Neto, T.G.S.; Dellani, R.; Leite, L.H.S. Comparative Study for Hardwood and Softwood Forest Biomass: Chemical Characterization, Combustion Phases and Gas and Particulate Matter Emissions. *Bioresour. Technol.* **2014**, *164*, 55–63. [\[CrossRef\]](#)
64. Marino, R.; Cano, Y.; Villanueva, M.C. Scientia Agropecuaria Almacenamiento de Carbono En Pastos Naturales Altoandinos Storage of Carbon in Natural Grasses High Andean. *Sci. Agropecu.* **2013**, *4*, 313–319.
65. Júnior, D.B.S.; Kelbert, M.; de Araújo, P.H.H.; de Andrade, C.J.; Júnior, D.B.S.; Kelbert, M.; de Araújo, P.H.H.; de Andrade, C.J. Physical Pretreatments of Lignocellulosic Biomass for Fermentable Sugar Production. *Sustain. Chem.* **2025**, *6*, 13. [\[CrossRef\]](#)
66. Lara-Serrano, M.; Morales-delaRosa, S.; Campos-Martín, J.M.; Fierro, J.L.G.; Lara-Serrano, M.; Morales-delaRosa, S.; Campos-Martín, J.M.; Fierro, J.L.G. Fractionation of Lignocellulosic Biomass by Selective Precipitation from Ionic Liquid Dissolution. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 1862. [\[CrossRef\]](#)
67. Mujtaba, M.; Fernandes Fraceto, L.; Fazeli, M.; Mukherjee, S.; Savassa, S.M.; Araujo de Medeiros, G.; do Espírito Santo Pereira, A.; Mancini, S.D.; Lipponen, J.; Vilaplana, F. Lignocellulosic Biomass from Agricultural Waste to the Circular Economy: A Review with Focus on Biofuels, Biocomposites and Bioplastics. *J. Clean. Prod.* **2023**, *402*, 136815. [\[CrossRef\]](#)
68. Malinowska, E.; Torma, S.; Malinowska, E.; Torma, S. Evaluation of Organic Waste Long-Term Effects on Cellulose, Hemicellulose and Lignin Content in Energy Grass Species Grown in East-Central Poland. *Energies* **2024**, *17*, 5598. [\[CrossRef\]](#)
69. Zhang, K.; Xu, Y.; Johnson, L.; Yuan, W.; Pei, Z.; Wang, D. Development of Near-Infrared Spectroscopy Models for Quantitative Determination of Cellulose and Hemicellulose Contents of Big Bluestem. *Renew. Energy* **2017**, *109*, 101–109. [\[CrossRef\]](#)
70. Shen, W.; Zhang, C.; Wang, G.; Li, Y.; Zhang, X.; Cui, Y.; Hu, Z.; Shen, S.; Xu, X.; Cao, Y.; et al. Variation Pattern in the Macromolecular (Cellulose, Hemicelluloses, Lignin) Composition of Cell Walls in *Pinus tabulaeformis* Tree Trunks at Different Ages as Revealed Using Multiple Techniques. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *268*, 131619. [\[CrossRef\]](#)
71. Tabish, A.N.; Irfan, M.; Irshad, M.; Hussain, M.A.; Zeb, H.; Jahangir, S.; Shahzad, A.; Siddiqi, M.H.; Mujtaba, M.A.; Fouad, Y.; et al. Optimization of Waste Biomass Demineralization through Response Surface Methodology and Enhancement of Thermochemical and Fusion Properties. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 27246. [\[CrossRef\]](#)
72. Ait Benhamou, A.; Abid, L.; Calvez, I.; Cloutier, A.; Nejad, M.; Stevanovic, T.; Landry, V. Advances in Lignin Chemistry, Bonding Performance, and Formaldehyde Emission Reduction in Lignin-Based Urea-Formaldehyde Adhesives: A Review. *ChemSusChem* **2025**, *18*, e202500491. [\[CrossRef\]](#)
73. Sampaio, T.Q.S.; Lima, S.B.; Pires, C.A.M. Influence of Extractives on the Composition of Bio-Oil from Biomass Pyrolysis—A Review. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2025**, *186*, 106919. [\[CrossRef\]](#)
74. Yao, X.; Zhao, Z.; Li, J.; Zhang, B.; Zhou, H.; Xu, K. Experimental Investigation of Physicochemical and Slagging Characteristics of Inorganic Constituents in Ash Residues from Gasification of Different Herbaceous Biomass. *Energy* **2020**, *198*, 117367. [\[CrossRef\]](#)
75. Qureshi, T.; Farooq, M.; Imran, S.; Munir, M.A.; Javed, M.A.; Sohoo, I.; Sultan, M.; Rehman, A.U.; Farhan, M.; Asim, M.; et al. Structural and Thermal Investigation of Lignocellulosic Biomass Conversion for Enhancing Sustainable Imperative in Progressive Organic Refinery Paradigm for Waste-to-Energy Applications. *Environ. Res.* **2024**, *246*, 118129. [\[CrossRef\]](#)
76. El-Sayed, S.A. Chemical Products Yielded from Different Pyrolysis Processes of Rice Waste Residues: A Comprehensive Review. *Biomass Convers. Biorefinery* **2025**, *15*, 20615–20655. [\[CrossRef\]](#)
77. Cruz, N.C.; Silva, F.C.; Tarelho, L.A.C.; Rodrigues, S.M. Critical Review of Key Variables Affecting Potential Recycling Applications of Ash Produced at Large-Scale Biomass Combustion Plants. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *150*, 104427. [\[CrossRef\]](#)
78. Vassilev, S.V.; Vassileva, C.G.; Song, Y.-C.; Li, W.-Y.; Feng, J. Ash Contents and Ash-Forming Elements of Biomass and Their Significance for Solid Biofuel Combustion. *Fuel* **2017**, *208*, 377–409. [\[CrossRef\]](#)
79. Niu, Y.; Tan, H.; Hui, S. Ash-Related Issues during Biomass Combustion: Alkali-Induced Slagging, Silicate Melt-Induced Slagging (Ash Fusion), Agglomeration, Corrosion, Ash Utilization, and Related Countermeasures. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2016**, *52*, 1–61. [\[CrossRef\]](#)
80. Abioye, K.J.; Harun, N.Y.; Sufian, S.; Yusuf, M.; Jagaba, A.H.; Ekeoma, B.C.; Kamyab, H.; Sikiru, S.; Waqas, S.; Ibrahim, H. A Review of Biomass Ash Related Problems: Mechanism, Solution, and Outlook. *J. Energy Inst.* **2024**, *112*, 101490. [\[CrossRef\]](#)

81. Luan, J.; Wang, Q.; Shao, D.; Cui, B.; Han, P.; He, Q. Research Progress on Influencing Factors and Control Methods of Slagging in Biomass Combustion. *Front. Energy Res.* **2025**, *13*, 1634354. [[CrossRef](#)]
82. Liu, B.; Tian, J.; Wang, P.; Deng, Z.; Xu, X.; Zeng, Z.; Li, L. Mechanistic Insights into Alkali Metal Migration and Slagging Behavior in K-Type Biomass Ash during Thermal Conversion. *Energy* **2025**, *329*, 136800. [[CrossRef](#)]
83. Zhang, J.; Wen, X.; Cheng, F. Preparation, Thermal Stability and Mechanical Properties of Inorganic Continuous Fibers Produced from Fly Ash and Magnesium Slag. *Waste Manag.* **2021**, *120*, 156–163. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
84. Singh, A.K.; Masto, R.E.; Hazra, B.; Esterle, J.; Singh, P.K. Genesis and Characteristics of Coal and Biomass Ash. In *Ash from Coal and Biomass Combustion*; Singh, A.K., Masto, R.E., Hazra, B., Esterle, J., Singh, P.K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; pp. 15–36, ISBN 978-3-030-56981-5.
85. Schmitz, M.; Linderholm, C. Chemical Looping Combustion of Biomass in 10- and 100-kW Pilots—Analysis of Conversion and Lifetime Using a Sintered Manganese Ore. *Fuel* **2018**, *231*, 73–84. [[CrossRef](#)]
86. Maj, I.; Niesporek, K.; Plaza, P.; Maier, J.; Łój, P. Biomass Ash: A Review of Chemical Compositions and Management Trends. *Sustainability* **2025**, *17*, 4925. [[CrossRef](#)]
87. Fajobi, M.O.; Lasode, O.A.; Adeleke, A.A.; Ikubanni, P.P.; Balogun, A.O. Investigation of Physicochemical Characteristics of Selected Lignocellulose Biomass. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 2918. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
88. Guo, Z.; Wu, J.; Zhang, Y.; Wang, F.; Guo, Y.; Chen, K.; Liu, H. Characteristics of Biomass Charcoal Briquettes and Pollutant Emission Reduction for Sulfur and Nitrogen during Combustion. *Fuel* **2020**, *272*, 117632. [[CrossRef](#)]
89. Ren, X.; Sun, R.; Meng, X.; Vorobiev, N.; Schiemann, M.; Levendis, Y.A. Carbon, Sulfur and Nitrogen Oxide Emissions from Combustion of Pulverized Raw and Torrefied Biomass. *Fuel* **2017**, *188*, 310–323. [[CrossRef](#)]
90. Białowiec, A.; Syguła, E. Carbon-Relative Molar Mass Is a New Parameter for Experimentation with Different Biomasses. Prediction of Higher Heating Value Case Study. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2025**, *83*, 115. [[CrossRef](#)]
91. Knox, N.M.; Grunwald, S.; McDowell, M.L.; Bruland, G.L.; Myers, D.B.; Harris, W.G. Modelling Soil Carbon Fractions with Visible Near-Infrared (VNIR) and Mid-Infrared (MIR) Spectroscopy. *Geoderma* **2015**, *239–240*, 229–239. [[CrossRef](#)]
92. Jara-Cobos, L.; Abril-González, M.; Pinos-Vélez, V. Production of Hydrogen from Lignocellulosic Biomass: A Review of Technologies. *Catalysts* **2023**, *13*, 766. [[CrossRef](#)]
93. Komilis, D.; Evangelou, A.; Giannakis, G.; Lymperis, C. Revisiting the Elemental Composition and the Calorific Value of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Waste Manag.* **2012**, *32*, 372–381. [[CrossRef](#)]
94. Ozgen, S.; Cernuschi, S.; Caserini, S. An Overview of Nitrogen Oxides Emissions from Biomass Combustion for Domestic Heat Production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *135*, 110113. [[CrossRef](#)]
95. Kar, T.; Keles, S. Environmental Impacts of Biomass Combustion for Heating and Electricity Generation. *J. Eng. Res. Appl. Sci.* **2016**, *5*, 458–465.
96. Ngangyo-Heya, M.; Foroughbahchk-Pournavab, R.; Carrillo-Parra, A.; Rutiaga-Quñones, J.G.; Zelinski, V.; Pintor-Ibarra, L.F. Calorific Value and Chemical Composition of Five Semi-Arid Mexican Tree Species. *Forests* **2016**, *7*, 58. [[CrossRef](#)]
97. de Muñiz, G.I.B.; Lengowski, E.C.; Nisgoski, S.; de Magalhães, W.L.E.; de Oliveira, V.T.; Hansel, F. Characterization of *Pinus* spp. Needles and Evaluation of Their Potential Use for Energy. *CERNE* **2014**, *20*, 245–250. [[CrossRef](#)]
98. Alonso, N.C.; Sala, G.R.; Sanahuja, A.B.; García, A.V. Comprehensive Study of Lignocellulosic Fraction, Structural and Chemical Composition, Mineral Profile, in Vitro Antioxidant Activity, and Phenolic Profile of Papaya Crop Byproducts. *Ind. Crops Prod.* **2025**, *224*, 120395. [[CrossRef](#)]
99. Shacha, N.; Dorji, Y.; Nepal, A.; Choden, S.; Ghally, T.B.; Dendup, K.C. Regeneration Status and Soil Nutrient Content in Burned Blue Pine Forest in Thimphu, Western Bhutan. *Indones. J. Soc. Environ. Issues* **2021**, *2*, 48–58. [[CrossRef](#)]
100. Reis Portilho, G.; Resende de Castro, V.; de Cássia Oliveira Carneiro, A.; Cola Zanuncio, J.; José Vinha Zanuncio, A.; Gabriella Surdi, P.; Gominho, J.; de Oliveira Araújo, S. Potential of Briquette Produced with Torrefied Agroforestry Biomass to Generate Energy. *Forests* **2020**, *11*, 1272. [[CrossRef](#)]
101. Obernberger, I.; Thek, G. *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of Pellets*; Routledge: London, UK, 2010; ISBN 978-1-84407-631-4.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.