

"Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Propuesta Divulgativa para el Acceso Universal del Conocimiento" es una obra resultado de la colaboración entre destacados investigadores y especialistas en diversas áreas de la bioenergía y la sustentabilidad, provenientes de instituciones líderes en el ámbito académico. El equipo multidisciplinario que ha contribuido a esta iniciativa está conformado por miembros de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Universidad Juárez del Estado de Durango, el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, y el Centro de Investigación en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. Guiados por académicos de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, se ha creado este material de consulta básica e introductorio sobre el aprovechamiento energético de la biomasa. Este material está dirigido a una amplia audiencia que incluye estudiantes, docentes, productores, miembros de comunidades rurales e indígenas, autoridades locales, investigadores, tecnólogos y emprendedores. Este documento abarca componentes desde la ciencia básica y la caracterización de recursos biomásicos, hasta la estimación del potencial energético, considerando aspectos teóricos, geográficos y análisis de impactos. El objetivo es fomentar la transición energética y tecnológica, promoviendo escenarios alternativos, justos y sostenibles que permitan la democratización de la energía desde un enfoque local. También se busca que se un ejemplar divulgativo, de acceso universal al conocimiento, por lo que se ha traducido a diferentes idiomas indígenas y extrajeros. Esperamos que esta obra sea una herramienta valiosa para quienes buscan comprender y contribuir al desarrollo de soluciones energéticas inclusivas y responsables, que posibiliten la construcción de una realidad distinta de forma segura, justa y sustentable.



Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán

prodep
TIPO SUPERIOR
PROGRAMA PARA EL DESARROLLO PROFESIONAL
DOCENTE PARA EL EJERCICIO FISCAL 2023

ISBN: 978-607-9386-18-4

"Este programa es público, ajeno a cualquier partido político. Queda prohibido el uso para fines distintos a los establecidos en el programa"

APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA: PROPUESTA DIVULGATIVA PARA EL ACCESO UNIVERSAL DEL CONOCIMIENTO

APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA

Propuesta divulgativa
para el acceso universal
del conocimiento



Mario Morales Máximo y Luis Bernardo López Sosa
Coordinadores



APLICACIONES ENERGÉTICAS
DE LA BIOMASA:
PROPUESTA DIVULGATIVA PARA EL ACCESO
UNIVERSAL DEL CONOCIMIENTO



Material de consulta y libre acceso de la
Universidad Intercultural indígena de Michoacán

*Aplicaciones energéticas de la biomasa: propuesta divulgativa
para el acceso universal del conocimiento*

Primera edición
Pátzcuaro, Michoacán, México.
Abril del 2024

Coordinadores:
Mario Morales Máximo y
Luis Bernardo López Sosa

Diseño y cuidado editorial: Víctor Manuel Valencia Castro.
Gestión editorial ISBN: Lic. Adán Ramírez Millán.

DR ® Universidad Intercultural Indígena de Michoacán
Publicación financiada con recursos del Programa para
el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) 2023.

“Este programa es público, ajeno a cualquier partido político.
Queda prohibido el uso para fines distintos a los establecidos en
el programa”.

ISBN: 978-607-9386-18-4

Esta obra refleja la opinión, análisis, métodos y resultados de los
autores y no necesariamente los de la UIIM. Por lo que el crédito
se asume para cada uno de los autores conforme corresponda.

PROCESO DE REVISIÓN POR PARES

Esta obra se sometió al sistema de dictaminación a “doble ciego” por especialistas en la materia. Los resultados de los dictámenes fueron emitidos por los evaluadores de forma positiva. De igual forma las evaluaciones positivas se emitieron a los autores a través del comité editorial. En la presente publicación el Consejo Editorial designó al siguiente grupo de evaluadores:

- Dr. Juan Antonio Sustaita Aranda, Universidad de Guanajuato, México.
- Dra. Ana Escoto Castillo, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dr. Humberto Ríos Bolívar, Instituto Politécnico Nacional, ESE, México.
- Dra. Patricia Murrieta Cummings, Universidad de Guadalajara, México.
- Dra. Cinthya Guadalupe Caamal Olvera, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Dr. Aníbal Cervantes Monsreal, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Dr. Arturo Contis Montes de Oca, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dra. Gabriela Hurtado Alvarado, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dr. José Luis Hernández Hernández, Universidad de la Costa Oaxaca, México.
- Dr. José Luis García Cué, Colegio de Postgraduados, México
- Dra. Arelly Romero Padilla, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Dra. Ma. De los Ángeles Martínez Ortega, Instituto Politécnico Nacional, ESIA-TEC, México.

ÍNDICE

Prólogo	9
Agradecimientos	11
Capítulo 1: Generalidades de los biocombustibles sólidos	13
Capítulo 2: Evaluación y diagnóstico de la biomasa disponible de forma local	17
Capítulo 3: Evaluación prospectiva del potencial energético de biomasa disponible espacial y temporalmente	21
Capítulo 4: Caracterización fisicoquímica en recursos biomásicos para biocombustibles sólidos: SEM, FTIR, RAMAN y DRX	29
Capítulo 5: Análisis proximal de los biocombustibles sólidos: humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo	37
Capítulo 6: Caracterización elemental de la biomasa con un enfoque en su potencial energético	43
Capítulo 7: Análisis de sustancias inorgánicas en la biomasa lignocelulósica	49
Capítulo 8: Análisis termogravimétrico aplicado a la caracterización de la biomasa	53
Capítulo 9: Caracterización energética: poder calorífico, compuestos poliméricos	61
Capítulo 10: Monitoreo de emisiones por el uso de biocombustibles sólidos	65
Capítulo 11: Aplicación y evaluación de la termografía para biocombustibles sólidos	71

Capítulo 12: Sustentabilidad de los biocombustibles sólidos	77
Capítulo 13: Producción y tecnología rural apropiada para uso final de los biocombustibles sólidos en comunidades rurales	83
Capítulo 14: Retos políticos y de gobernanza energética, una mirada desde las experiencias locales en México	89
Semblanzas de coordinadores	95
Semblanza de autores y autoras	97

PRÓLOGO

Una de las tareas que debe ser cotidiana en el quehacer contemporáneo del sector académico, es la difusión y divulgación del conocimiento. Ante los problemas que se han agravado en años recientes como la sequía, el cambio de uso de suelo, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, pérdida del patrimonio, y las transformaciones sociales, es necesario poner los avances humanísticos, científicos, tecnológicos y de innovación, al servicio de la sociedad y del medio ambiente. En este sentido, uno de los retos actuales radica en establecer procesos dialógicos de conocimientos de forma intercomunitaria, multisectorial, multidisciplinar, en todas partes y con todas las personas. Lo cual no es tarea sencilla, puesto que representa un cambio de paradigma en el día a día de las y los investigadores, la comunidad tecnológica y de toda la comunidad académica en general. No es fácil salir de una zona de confort y mucho menos entablar relaciones interpersonales cuando la lengua, la cultura y la tradición son distintas, y que en muchos casos representan una barrera que imposibilita el diálogo de saberes y la construcción conjunta de conocimientos. Entonces, las estrategias de diseminación, difusión, divulgación y construcción de conocimiento, hoy requieren de formas articuladas, fundadas y motivadas por procesos participativos, consensuados, con vinculación comunitaria y de interacción cercana con las poblaciones más distantes territorialmente hablando; porque no solo es necesario llegar a lugares lejanos, sino una vez llegando aprender y compartir, entender y construir distintas maneras de percibir y comprender el mundo, así como de co-generar conocimiento. Con las consideraciones anteriores, esta obra representa un ejercicio valioso, que entrelaza el quehacer investigativo de un grupo de personas provenientes de distintas universidades de México, que elaboraron 14 capítulos divulgativos sobre el aprovechamiento energético de la biomasa, y que, con el apoyo de intérpretes, hablantes de lenguas originarias de distintas comunidades, han construido de forma conjunta una obra editorial inédita multilingüe que pretende, por una parte ser un referente como material de divulgación en lenguas originarias como parte de una estrategia de acceso universal del conocimiento; y por otra, fomentar el rescate, preservación y revitalización de las lenguas originarias de México.

PRÓLOGO

Esta obra es un ejemplo de la suma de voluntades por mostrar una forma de democratizar el conocimiento y buscar alternativas para superar algunos de los retos de comunicación, buscando los canales más asertivos, pero principalmente encaminarse a la construcción de nuevas dinámicas de difusión y divulgación del conocimiento de manera inclusiva.

Luis Bernardo López Sosa

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los pueblos originarios del estado de Michoacán, también a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán por el apoyo editorial para la realización de esta obra, y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente ejercicio 2023 por el apoyo con el financiamiento para la versión impresa.

Se agradece también al programa de estancias Posdoctorales del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES
MARIO MORALES MÁXIMO
LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA

1 Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, México, C. P. 61614. E-mail: mario.morales@uiim.edu.mx, lbernardo.lopez@uiim.edu.mx

2 Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica S/N, Edificio “D”, Ciudad Universitaria. C.P.58040, Morelia, Michoacán, México. E-mail: jose.rutiaga@umich.mx

Resumen

Las energías renovables comprenden hidráulica, eólica, geotérmica, solar y biomasa. Esta última es una fuente importante y prometedora para la generación de energía alternativa a la energía de los combustibles de origen fósil, y está disponible a partir de residuos forestales y maderables, además de diferentes residuos agroindustriales y por supuesto de los cultivos energéticos. Este tipo de biomasa y los biocombustibles sólidos densificados (pellets y briquetas) que pudieran elaborarse a partir de ella, son una opción importante para lograr fuentes de energía más sostenibles y limpias, y con su uso adecuado y sostenible, pudieran contribuir a mitigar el cambio climático.

Palabras clave: pellets, briquetas, densidad de partícula, análisis proximal, poder calorífico.

Las fuentes de energía renovable son un componente fundamental en la búsqueda de soluciones sostenibles para abastecer las necesidades energéticas de la población mundial y a su vez reducir el impacto ambiental (Al-Shetwi et al., 2020) the grid integration requirements have become the major concern as renewable energy sources (RESs). Estas fuentes de energía se caracterizan por su capacidad para regenerarse de manera natural y continua, a diferencia de los combustibles fósiles, que son finitos y contribuyen al cambio climático (Mandley et al., 2020). Las energías renovables pueden clasificarse en hidráulica, eólica, geotérmica, solar y biomasa (Velázquez-Martí, 2018).

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes prometedoras para la generación de energía alternativa, y es considerada una fuente de energía renovable de gran importancia en la búsqueda de alternativas sostenibles y limpias que puede

satisfacer las necesidades energéticas, ya que ésta se deriva principalmente de materiales vegetales compuestos por lignina, celulosa y hemicelulosa, que son componentes estructurales de las plantas y que pueden presentar numerosas ventajas como fuente de energía renovable (Angulo-Mosquera et al., 2021) analyse the pretreatments and thermal treatments required to recover energy, and compare them with traditional fossil fuels. Other areas such as the sustainability and economic feasibility of solid biofuels are likewise addressed by explaining frequently used tools to evaluate the environmental impact as Life Cycle Assessment (LCA. Esta biomasa puede obtenerse a partir de residuos agrícolas, forestales y de la industria de la madera, así como de cultivos energéticos (Velázquez-Martí, 2018).

El uso de biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención de biocombustibles sólidos presenta varias ventajas clave; en primer lugar, ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y la seguridad energética. Además, estos biocombustibles son neutros en carbono, ya que el dióxido de carbono (CO₂) liberado durante su combustión es equivalente a la cantidad que las plantas absorbieron durante su crecimiento, lo que los convierte en una opción más sostenible desde el punto de vista ambiental (Morales-Máximo et al., 2022).

Biocombustibles sólidos. Estos biocombustibles son una alternativa a los combustibles fósiles y se utilizan principalmente para la generación de calor y energía en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. En general, los biocombustibles sólidos son leñas, astillas y carbón vegetal, y también se pueden considerar las pajas y otros biocombustibles sólidos de residuos agrícolas (Camps y Marcos, 2008), además de los densificados como los pellets y las briquetas (Velázquez-Martí, 2018). En la Tabla 1 se observa una clasificación general de los biocombustibles (Camps y Marcos, 2008).

TABLA 1. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Biocombustibles		Tamaño	Uso principal	Usos alternativos
Sólidos	Leñas	Variable	Combustión doméstica	Carbón vegetal, astillas, mejorador de suelos
	Astillas	L = 3 a 10 cm; A = 2 a 6 cm; E = 2 cm	Combustión directa	Pulpa para papel y cartón, tableros de fibras, tableros de partículas, pellets, briquetas,
	Carbón vegetal	Longitud variable D = 5 a 50 cm	Doméstico	Industrial, carbón activado
Sólidos densificados	Pellets	L = 1 a 7 cm; D = 6 a 25 mm	Calefacción doméstica	Estufas automáticas, gasificadores, calderas
	Briquetas	L = 32 cm; D = 7.5 a 9 cm	Calefacción doméstica	Calderas, estufas ahorradoras de leña

A continuación, se pueden apreciar algunos aspectos genéricos relevantes de los biocombustibles sólidos y más adelante se da una breve descripción sobre de los biocombustibles sólidos densificados (pellets y briquetas) derivados de subproductos lignocelulósicos.

1. Tipos de biocombustibles sólidos:

- Leña: madera cortada y seca utilizada para calefacción y energía.
- Residuos agrícolas: restos de cultivos como paja, cáscaras de maíz, etc.
- Residuos forestales: materiales orgánicos de bosques y selvas, como ramas y hojas.
- Pellets de biomasa: pequeños cilindros comprimidos hechos de materiales como aserrín, virutas de madera, etc.

2. Ventajas:

- Son una fuente de energía renovable, ya que provienen de recursos naturales que pueden regenerarse.
- Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles.
- Pueden ser una opción más económica en regiones con acceso limitado a combustibles convencionales.

3. Desafíos:

- La disponibilidad de materia prima puede ser limitada y está sujeta a variaciones estacionales.
- Requieren tecnologías de conversión y sistemas de almacenamiento específicos.
- Pueden generar emisiones de partículas finas y otros contaminantes si no se queman de manera eficiente.

4. Aplicaciones:

- Calefacción residencial y comercial.
- Generación de energía eléctrica en plantas de biomasa.
- Procesos industriales que requieren calor, como la producción de vapor en la industria papelera o química.
- Tecnologías apropiadas rurales (estufas ahorradoras de leña, secadores para madera, fogones de cocción de alimentos etc).

5. Sostenibilidad:

- La sostenibilidad de los biocombustibles sólidos depende de prácticas forestales y agrícolas responsables para garantizar la regeneración de la biomasa utilizada.
- La gestión adecuada de la cadena de suministro es esencial para minimizar el impacto ambiental.

Pellets. Se trata de cilindros que son obtenidos por compactación. Brevemente, el material es alimentado a la tolva del equipo de pelletizado y es empujado contra la matriz que cuenta con orificios circulares por donde finalmente salen los pellets (Camps y Marcos, 2008).

Briquetas. Son biocombustibles también son formadas por compactación de la biomasa lignocelulósica. La forma suele ser cilíndrica, pero puede haber otras. Las briquetas pueden obtenerse usando calentamiento y presión (Camps y Marcos, 2008), pero también pueden formarse sin necesidad de alta presión y a temperatura ambiente (Morales-Máximo et al., 2020).

Características y propiedades de los pellets y las briquetas. Las principales características y propiedades de estos biocombustibles sólidos son: físicas (humedad, forma, tamaño, aspecto, densidad y friabilidad), químicas (composición elemental y básica, y poder calorífico, químico físicas (coeficiente de conductividad térmica, combustibilidad, inflamabilidad, temperatura máxima de flama, potencia calorífica y densidad energética) (Camps y Marcos, 2008).

Referencias

- Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., Mansur, M., & Mahlia, T. M. I. (2020). Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119831>
- Angulo-Mosquera, L. S., Alvarado-Alvarado, A. A., Rivas-Arrieta, M. J., Cattaneo, C. R., Rene, E. R., & García-Depraect, O. (2021). Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives. *Science of the Total Environment*, 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148816>
- Camps, M. y Marcos, F. (2008). *Los Biocombustibles*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Mandley, S. J., Daioglou, V., Junginger, H. M., van Vuuren, D. P., & Wicke, B. (2020). EU bioenergy development to 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(April), 109858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109858>
- Morales-Máximo, M., Rutiaga-Quiñones, J. G., Masera, O., & Ruiz-García, V. M. (2022). Briquettes from *Pinus* spp . Residues : Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies*, 15(9), 3419. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093419>
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020) Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Appl. Sci.*, 10, 2933. doi:10.3390/app10082933
- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la Biomasa Para Uso Energético*, 2nd ed.; Editorial Reverté, Universitat Politècnica de València.

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA BIOMASA DISPONIBLE DE FORMA LOCAL

MARIO MORALES MÁXIMO^{1,2}

1 Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km. 3, Pátzcuaro 61614, Michoacán, México

2 Escuela de Diseño de Interiores y Ambientación, de la Universidad Vasco de Quiroga Blvd Juan Pablo II #555, Santa María de Guido, 58090 Morelia, Michoacán, México. E-mail: mario.morales@uim.edu.mx, mmoralesmaximo@uvaq.edu.mx

Resumen

El diagnóstico de las necesidades energéticas a través de la biomasa es crucial para evaluar y satisfacer de manera eficiente y sostenible la demanda de energía en una región específica; esta evaluación multidisciplinaria considera factores técnicos, ambientales, económicos y sociales, buscando equilibrar las necesidades humanas con la conservación del medio ambiente, la biomasa lignocelulósica, proveniente de materiales vegetales ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, se destaca como una fuente prometedora de energía renovable. Sin embargo, su aprovechamiento plantea desafíos técnicos y económicos.

Palabras clave: Diagnóstico, biomasa, biocombustibles, bioenergía local.

Introducción

La biomasa lignocelulósica, derivada de residuos agrícolas y forestales, se considera una fuente valiosa de energía renovable (Cai et al., 2017). Este tipo de biomasa, al capturar carbono a través de la fotosíntesis, ofrece ventajas ambientales, aunque también presenta desafíos en eficiencia y gestión sostenible (Orihuela et al., 2016). La tecnología en este campo evoluciona para mejorar procesos y ampliar aplicaciones, contribuyendo a un contexto de energía más sostenible.

Este diagnóstico se enfoca en evaluar y cuantificar la cantidad y calidad de la biomasa disponible en una localidad específica, esto proporciona una base sólida para la planificación estratégica y la toma de decisiones informadas en relación con el uso de la biomasa, ya sea para la generación de energía, la producción de biocombustibles, la fabricación de productos o la restauración del suelo (Rezeau et al., 2018).

Realizar un diagnóstico de la biomasa disponible localmente implica una serie de pasos clave que permiten recopilar datos, analizar tendencias y tomar decisiones informadas.

Metodología de diagnóstico

La metodología de diagnóstico se inicia con la definición clara de objetivos, seguida por la identificación de la localidad de interés, la recopilación de datos geográficos y el inventario de recursos biológicos son pasos clave, la cuantificación precisa de biomasa, análisis de calidad y evaluación de su potencial energético son esenciales, la consideración de factores sociales y ambientales, junto con la viabilidad técnica y económica, guían la toma de decisiones.

Pasos para el diagnóstico:

Definición de objetivos: Antes de comenzar el diagnóstico, es crucial definir claramente los objetivos que se persiguen, esto podría incluir evaluar el potencial de biomasa como fuente de energía renovable, identificar áreas de conservación prioritaria o analizar su uso en la producción agrícola (Isaac et al., 2007) shade provision and low access to fertilizers often result in the purposeful integration of upper canopy trees in cocoa (*Theobroma cacao*).

Identificación de la localidad: Define el área geográfica de interés (región, comunidad o zona específica).

Recopilación de datos geográficos: Reúne información sobre geografía, topografía, clima y suelos, influyendo en la distribución de biomasa.

Inventario de recursos biológicos: Clasifica los recursos biológicos disponibles, incluyendo plantas, árboles, residuos agrícolas y forestales.

Identificación de fuentes de biomasa: Mapea fuentes potenciales de biomasa, colaborando con instituciones locales y comunidades.

Cuantificación de biomasa: Mide la cantidad de biomasa utilizando métodos de muestreo y tecnologías de detección, asegurando precisión.

Análisis de calidad de biomasa: Evalúa contenido de humedad, densidad, composición química y otros factores críticos.

Potencial energético y usos: Se calcula el potencial energético de la biomasa y analiza sus posibles aplicaciones, esto puede incluir la generación de electricidad, calefacción, producción de biogás, biocombustibles y más (Morales-Máximo et al., 2021).

El potencial energético de la biomasa se obtiene a partir de la relación que existe entre la masa de residuo seco (M_{rs}) y la energía del residuo por unidad de masa (E) también conocida como Poder Calorífico (PC). En la ecuación 1 se expresa la relación existente entre las variables y se plantea un modelo matemático aproximado (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016).

$$PE = (Mrs) * (E) \quad (1)$$

Donde:

PE: Potencial energético [Tj/año]

Mrs: Masa de residuo seco [t/año]

E: Energía del residuo por unidad de masa [Tj/t]

PC: Poder calorífico (MJ/kg)

Muestreo y medición: Selecciona áreas representativas para muestreos, garantizando precisión y ubicación adecuada.

Análisis de datos: Procesa datos recolectados con herramientas estadísticas y software especializado.

Interpretación y evaluación: Analiza resultados en relación con objetivos establecidos, considerando el potencial de biomasa para usos específicos.

Consideraciones sociales y ambientales: Evalúa impacto en biodiversidad, agua, suelo y comunidades locales.

Comunicación y acción: Comparte resultados con partes interesadas, utilizando la información para decisiones informadas y estrategias de gestión.

Conclusión

El diagnóstico de biomasa local es esencial para un desarrollo sostenible, permite una planificación eficiente de recursos, reducción de costos, diversificación de fuentes de energía, y contribuye al crecimiento económico local. Además, proporciona información objetiva para decisiones gubernamentales, inversiones y estrategias empresariales, facilitando el equilibrio entre las necesidades humanas y la preservación del medio ambiente.

Referencias

- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., & Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(January), 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>
- Isaac, M. E., Timmer, V. R., & Quashie-Sam, S. J. (2007). Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: Biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78(2), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9081-3>
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of *pinus* spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. *Forests*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/f12080977>

- Orihuela, R., Reyes, L. A., Rangel, J. R., Chávez, M. C., Márquez, F., Correa, F., Carrillo, A., & Rutiaga, J. G. (2016). Elaboración de briquetas con residuos maderables de pino. In Rutiaga y Carrillo (Ed.), *Química de los materiales lignocelulósicos y su potencial bioenergético* (1nd ed., p. Capítulo 11).
- Rezeau, A., Díez, L. I., Royo, J., & Díaz-Ramírez, M. (2018). Efficient diagnosis of grate-fired biomass boilers by a simplified CFD-based approach. *Fuel Processing Technology*, 171(October 2017), 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.024>
- Serrato Monroy, C. C., & Lesmes Cepeda, V. (2016). Metodología Para El Cálculo De Energía Extraída a Partir De La Biomasa En El Departamento De Cundinamarca [UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS]. In *Tesis*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3687>

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA DISPONIBLE ESPACIAL Y TEMPORALMENTE

LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA¹
MARIO MORALES-MÁXIMO¹
CARLOS A. GARCÍA²
RICARDO GONZÁLEZ-CARABES

¹ Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, México, C. P. 61614. E-mail: lbernardo.lopez@uiim.edu.mx mario.morales@uiim.edu.mx

² Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México. E-mail: cgarcia@enesmorelia.unam.mx

Resumen

Se presenta a continuación una descripción general para la determinación del potencial energético disponible en poblaciones específicas, a partir de la identificación espacial y temporal, mediante diagnósticos cuantitativos, así como la determinación del poder calorífico de determinados tipos de biomasa. El interés principal de esta propuesta se orienta hacia el aprovechamiento de los residuos agrícolas y agroindustriales, para conocer la intensidad bioenergética para ciertas áreas y periodos de tiempo, de manera participativa, e inferir la viabilidad de implementación de cadenas de valor para la generación de biocombustibles sólidos a partir de estos residuos.

Palabras clave: energía rural, sustentabilidad, comunidad, bioenergía.

Introducción

Uno de los recursos energéticos renovables más estudiados en los últimos años es la biomasa, esto se debe a que millones de personas en el mundo dependen de este recurso para satisfacer sus necesidades básicas diarias (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2013; Serrano-Medrano M, Arias-chalico, Ghilardi and Masera, 2014; Tauro, Serrano-Medrano and Masera, 2018). La biomasa como combustible, es un recurso renovable cuando se gestiona de forma sustentable, resulta de bajo costo, es asequible y de bajo impacto ambiental.

En muchas poblaciones rurales, la biomasa es uno de los energéticos de mayor uso (García-martínez *et al.*, 2022; López-Sosa and García, 2022) y es la fuente de

energía mayoritaria, por encima de las necesidades colectivas y productivas, donde estas últimas suelen ser de bajo consumo.

En este apartado de forma general se comenta sobre la identificación los recursos residuales biomásicos agrícolas, agroindustriales y del sector productivo comunitario. Que, a partir de su disposición espacial, temporal, y que con la determinación del poder calorífico de estos residuos es posible estimar preliminarmente el potencial energético para determinada biomasa, en cierto lugar y con acotada temporalidad.

El potencial energético disponible localmente

Cuando se trata de abordar estimaciones que validen la pertinencia de implementación de tecnologías que aprovechen energías renovables, es necesario indagar en las evaluaciones de los recursos disponibles (Velasco, 2009; Jorge I., Fabio M., Paloma M., 2015). Previo a cualquier proceso de construcción de plantas o procesos relacionados con estas energías, que requieren infraestructura física y, por ende, inversiones, las estimaciones teóricas que muestren la abundancia o limitaciones de los recursos energéticos son necesarias. En el caso de la biomasa, una de las herramientas preliminares de análisis es la estimación del potencial energético, que permite conocer la cantidad de recursos energéticos que pueden estar disponibles en determinado lugar para cierta biomasa de primer uso o residual. La estimación de la energía disponible no es sencilla, resulta un tema complejo por tratarse de un recurso multidimensional y de aplicaciones diversas. La literatura refiere al potencial de biomasa de diversas maneras.

Una cadena energética de alto valor considera desde la identificación de los recursos biomásicos de interés, hasta la disposición final y útil que estos entregan energéticamente para tareas o procesos específicos de los diferentes sectores.

A continuación, se mencionarán algunas recomendaciones para el estudio del potencial energético disponible a partir de biomasa local. Y se asumen algunas consideraciones:

- Las aplicaciones energéticas se estiman para biocombustibles del tipo sólido.
- Se establecen casos ideales del aprovechamiento considerando la biomasa energéticamente disponible libre de agentes tóxicos.
- Los recursos de biomasa principalmente se refieren a residuos generados de procesos y actividades agrícolas y agroindustriales.
- Los recursos biomásicos, son libre acceso, sin costos tabulados, sistematizados o catalogados por bienes o servicios.
- El objetivo es mostrar un panorama de gestión local de recursos biomásicos, apegados a procesos de remoción, procesamiento y disposición final.
- Se toma como clasificación principal de biocombustibles sólidos al material densificado en forma de pellets o briquetas.
- Se han identificado componentes del proceso de gestión de recursos biomásicos residuales, a través de experiencias e investigaciones previas, de donde se generan recomendaciones para la estimación del potencial energético.

En este sentido, la identificación del potencial energético disponible para biomasa que puede aplicarse en biocombustibles sólidos no considera aspectos de potencial técnico, económico ni de implementación (Offermann *et al.*, 2011; Ruppert, Kappas and Ibendorf, 2013; Arne Roth, 2016), sólo analiza el potencial teórico y geográfico, y esta perspectiva se aborda desde tres etapas:

La identificación del recurso energético disponible

El recurso energético teóricamente disponible se estima a partir de los datos del diagnóstico de biomasa de primer uso o residual producidos en la zona de estudio o interés. Existe literatura especializada sobre realización de diagnóstico que puede utilizarse para este objetivo (López-Sosa & Mario-Morales, 2022). Se pueden utilizar algunos recursos de la metodología diagnóstica exploratoria y cuantitativa que sirve de base para este tipo de estimaciones. En primer lugar es necesario generar instrumentos de diagnóstico que consideren la identificación de los recursos biomásicos de interés: (a) sus características morfológicas, inocuas, dimensionales, y de frecuencia disponible (b) las características de la gestión, cómo se recolecta, dónde se agrupa, qué procesamiento recibe y cuál es su uso y residencia final (c) cuáles son las posibilidades de acceso, remoción/recolección y uso de los residuos y (d) dependiendo las características de la biomasa, indagar en la información que contribuya a conocer contextualmente las características que posibiliten su uso energético. Posteriormente se requiere caracterizar los recursos biomásicos, ponderando la estimación teórica o experimental del poder calorífico. De tal forma que se combine la identificación de los recursos biomásicos disponibles con el contenido energético unitario, por unidad de masa o unidad de volumen (metro cúbico). Así, el potencial energético de la biomasa se obtiene de la relación entre la masa de recurso biomásico seco (M_{rs}), comúnmente a menos de 15% de humedad, y la energía del residuo por unidad de masa (E), también conocida como poder calorífico (PC). La ecuación (1) muestra la relación entre las variables y propone una expresión aproximada para determinar el potencial energético disponible (Morales-Máximo *et al.*, 2023)

$$P_e = M_{rs} * P_c \quad (1)$$

Donde:

P_e : Energía potencial [TJ/año]

M_{rs} : Masa de recurso biomásico seco [t/año]

P_c : Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]

Si bien esta aproximación general es habitual para conocer de forma preliminar el potencial energético, en estos casos la biomasa se considera con el menor contenido de humedad posible, que mayoritariamente se aproxima al 12%, y por los valores estimados del poder calorífico supone un valor superior al que la biomasa posee

en condiciones de uso cotidiano para fines energéticos; porque gana humedad del ambiente o en ocasiones no pierde la suficiente para ser combustionada.

El contenido de humedad es determinante al momento de estimar el potencial energético teórico y geográficamente disponible. En condiciones reales, es difícil conocer todo el contenido de humedad de recursos biomásicos (FAO, 2004). De aquí que, sea un uso energético o de otro tipo, estimar el contenido de humedad de recursos biomásicos de un universo de muestras en lugares distintos es complejo, y estadísticamente limitado. Es por ello por lo que, muchas de las aproximaciones genéricas y preliminares, se realizan estimaciones donde se considera el poder calorífico de la biomasa seca. En este sentido, en condiciones controladas y bastante delimitadas, en empresas, talleres, plantas de generación o áreas de cultivo, se pueden hacer análisis estadísticos que permitan conocer el valor del contenido de humedad de la biomasa que es potencialmente dispuesta a ser combustionada o que se combustiona o bien que se puede utilizar en proceso de fabricación de biocombustibles sólidos. Con esta precisión si es posible conocer el contenido de humedad, por rangos, promedios, medianas, o distribución normal. En estos casos mencionados, de manera más precisa se puede estimar el poder calorífico neto real ($H_{v(w)}$), que considera el poder calorífico de la materia seca $H_{v(wf)}$, y el contenido de humedad de la biomasa (w), y se estima con la ecuación 2 (Kaltschmitt, Thrän and Smith, 2003; FAO, 2004):

$$H_{v(w)} = \frac{H_{v(wf)}[(100-w)-2.44w]}{100} \quad (2)$$

La constante 2.44 resulta del calor de evaporación de agua (Kaltschmitt, Thrän and Smith, 2003). Combinando las ecuaciones 1 y 2, la ecuación 3 muestra una manera de estimar potencial energético en condiciones de humedad (P_{eh}) que estadísticamente puede ser estimada.

$$P_{eh} = M_{rs} * H_{v(w)} \quad (3)$$

La humedad es un factor determinante para el aprovechamiento, gestión de biocombustibles y cumplimiento de tareas, pero superable con el procesamiento adecuado.

La disposición técnico-energética

Si bien los datos del poder calorífico y la estimación de los recursos disponibles son útiles para conocer el potencial energético, también se debe precisar que es importante establecer algunas recomendaciones para priorizar la factibilidad técnica de los residuos o recursos biomásicos analizados desde su fase diagnóstica, por ejemplo:

- La recolección y procesamiento.
- La asequibilidad de recolección.

Disposición espacial y temporal

También la estimación de los residuos/biomasa generados y la energía disponible depende de una escala temporal. Acotada al período de productividad, en algunos casos vinculado a los tiempos de cosecha, a la importancia de recursos orgánicos, o bien simplemente por la vocación productiva de las regiones, empresas o agricultores de interés. En cualquier caso, se debe definir una escala de tiempo mensual o anual, y realizarse estimaciones periódicas para conocer el potencial energético disponible durante un “año modelo”, es decir un año que es estadísticamente común conforme a la escala de tiempo reciente sin presentar anomalías (Años recientes).

Por otro lado, para incorporar elementos del potencial geográfico (La ubicación de la producción de residuos y energía disponible), se recomienda hacer una delimitación espacial (Latitud y longitud) de los puntos de generación de recursos biomásicos, y conjuntar la intensidad de producción con el potencial energético. Esto se logra a partir de la geolocalización de los puntos de interés, articulados con marcos geoestadísticos regionales; que, en el caso de México suelen estar disponibles en plataformas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017). Así, mediante el uso de software de análisis espacial, es posible elaborar mapas de distribución energética por zonas o puntos focales.

La Figura 1, por ejemplo, muestra un mapeo energético a partir de la identificación de la producción de residuos de 50 talleres artesanales que fabrican muebles de madera en la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro. Utilizando marcos geoestadísticos de la comunidad, así como un diagnóstico de los residuos maderables y estimando el poder calorífico de éstos, fue posible conocer la energía disponible, espacial y temporalmente, que ronda en su límite superior los 2.8 TJ/año. Ciertamente, es una aproximación bastante genérica, porque se considera el poder calorífico del recurso en materia seca, y porque se suponen estimaciones de producción de residuos con poca oscilación. Pero son datos de referencia que ayudan a construir escenarios prospectivos, para tomar decisiones y buscar la gestión de combustibles alternativos cuando se considere conveniente, así como identificar posibles tecnologías de uso final para optimizar tareas y procesos.

Comentarios finales

En este apartado se han abordado algunos aspectos vinculados a la identificación de recursos biomásicos que, en suma, su caracterización y la identificación de la producción de forma espacial y temporal contribuyen a la determinación del potencial energético disponible. Permitiendo inferir posibles escenarios para definir

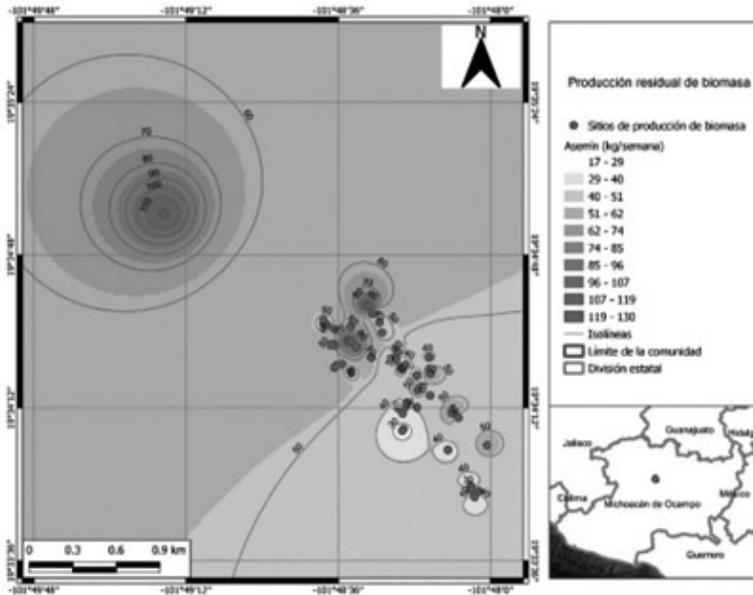


Figura 1. Mapeo energético de residuos maderables disponibles en 50 talleres artesanales de fabricación de muebles (Morales-Máximo et al., 2023).

cadena productiva de gestión de residuos para el desarrollo de biocombustibles sólidos, la estrategia de gestión de biocombustibles sólidos no está únicamente vinculada a la estimación de los potenciales biomásicos, también se deben considerar algunos otros aspectos que se vinculen con las dimensiones de la sostenibilidad. Si bien, estas recomendaciones pueden ser generales y con limitaciones, representan resultados de experiencias en común de diversos proyectos de implementación a escala local de recursos y residuos sólidos para poblaciones rurales. Además, son elementos que sugieren algunas directrices pueden considerarse cuando se parte de la identificación de potencial energético teórico y geográfico a partir de recursos de biomasa, y se pretende migrar a cadenas energéticamente productivas sustentadas en biocombustibles sólidos locales, cuyos beneficios además de energéticos también pueden ser económicos y socioambientales y generar esquemas de democratización de la energía y promover como meta, la construcción de sistemas energéticos rurales sustentables.

Referencias

- Arne Roth, F.R.& V.B. (2016) 'Potentials of Biomass and Renewable Energy: The Question of Sustainable Availability', in *Biokerosene Status and Prospects*. Martin Kal. SPRINGER, p. 128.
- FAO (2004) 'Unified Bioenergy Terminology', (December), pp. 1–50. Available at: <http://www.fao.org/3/b-j4504e.pdf>.

- García-martínez, J. *et al.* (2022) 'Anticipating alliances of stakeholders in the optimal design of community energy systems', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54(June), p. 102880. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102880>.
- INEGI (2017) 'Marco Geoestadístico. Sistema Nacional de Información Geográfica y Estadística.', *Gobierno de México* [Preprint].
- Jorge I., Fabio M., Paloma M., G.G. (2015) 'Hacia un sistema energético mexicano bajo en carbono. Desplegando el potencial de las energías renovables y del ahorro y uso eficiente de la energía', p. 222.
- Kaltschmitt, M., Thrän, D. and Smith, K.R. (2003) 'Renewable Energy from Biomass', *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 14, pp. 203–228. Available at: <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00059-4>.
- López-Sosa, L.B. and García, C.A. (2022) 'Towards the construction of a sustainable rural energy system: Case study of an indigenous community in Mexico', *Energy for Sustainable Development*, 70, pp. 524–536. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.022>.
- M., L.L.-S. & M.-M. (2022) *Vinculación, Innovación Y Diseño Para El Desarrollo De Proyectos Ecotecnológicos*. Edited by U.I.I. de Michoacán.
- Manzano-Agugliaro, F. *et al.* (2013) 'Scientific production of renewable energies worldwide: An overview', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp. 134–143. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.020>.
- MONROY, C.C.S. and CEPEDA, V.L. (2016) 'Universidad distrital francisco José de caldas facultad de ingeniería, proyecto cular ingeniería eléctrica. bogotá, colombia 2016', pp. 1–79.
- Morales-m, M. *et al.* (2023) 'Multifactorial Assessment of the Bioenergetic Potential of Residual Biomass of Pinus spp . in a Rural Community : From Functional Characterization to Mapping of the Available Energy Resource'.
- Offermann, R. *et al.* (2011) 'Assessment of global bioenergy potentials', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(1), pp. 103–115. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9247-9>.
- Ruppert, H., Kappas, M. and Ibendorf, J. (2013) *Sustainable bioenergy production - An integrated approach, Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6642-6>.
- Serrano-Medrano M, Arias-chalico, T., Ghilardi, A. and Masera, O. (2014) 'Energy for Sustainable Development Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico', *Energy for Sustainable Development*, 19, pp. 39–46. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>.
- Smeets, E.M.W. and Faaij, A.P.C. (2007) 'Bioenergy potentials from forestry in 2050: An assessment of the drivers that determine the potentials', *Climatic Change*, 81(3–4), pp. 353–390. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9163-x>.
- Tauro, R., Serrano-Medrano, M. and Masera, O. (2018) 'Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power',

Clean Technologies and Environmental Policy, 20(7), pp. 1527–1539. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>.

Velasco, J.G. (2009) *Energías renovables*. Edited by Reverte. Barcelona. Available at: <https://doi.org/9788429179125>.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA EN RECURSOS BIOMÁSICOS PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS: SEM, FTIR, RAMAN Y DRX

LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA
ARTURO AGUILERA MANDUJANO
MARIO MORALES-MÁXIMO
RICARDO GONZÁLEZ CÁRABES

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, C. P. 61614. E-mail: lbernardo.lopez@uiim.edu.mx aragma7@hotmail.com mario.morales@uiim.edu.mx

Resumen

Este apartado aborda de manera descriptiva algunas técnicas de caracterización que pueden ser utilizadas para el análisis morfológico y fisicoquímico en recursos biomásicos. Se mencionan las técnicas de caracterización como Difracción de Rayos X, Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier, Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía Raman. De forma general, en cada técnica, comenta su principio de operación y se describe los resultados que se originan, haciendo énfasis en su utilización en biomasa para su uso como biocombustibles sólidos.

Palabras clave: morfología, bioenergía, caracterización, análisis químico, materiales.

Introducción

Una forma de analizar las entrañas de los materiales biomásicos es través de sus componentes más pequeñas. Es decir, a nivel de su estructura atómica y fisicoquímica a través de técnicas especializadas no destructivas como Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopía Raman (Raman), todas técnicas de análisis especializadas que se utilizan en laboratorios específicos para conocer a detalle los materiales, sus propiedades y posibles aplicaciones energéticas de la biomasa.

Estos análisis se pueden realizar después de un proceso de preparación de las muestras biomásicas de interés. Comenzando por el lavado para eliminar las im-

purezas que pueden sesgar en análisis de las muestras; posteriormente se debe llevar a cabo el secado que se adapte a las necesidades de quien realice el análisis, haciendo uso de combustibles convencionales o bien utilizando fuentes de energía renovables. Después del secado, las muestras deberán ser trituradas mediante mollienda mecánica, con equipos que estén al alcance o bien, utilizando trituradoras industriales; esto también dependerá de las características de los recursos o residuos de biomasa, las cuales en ocasiones después del secado continúan fibrosos y poseen consistencia rígida difícil de triturar como es el caso de los residuos de mango (Tiwari, Sharma and Sharma, 2016; Larios *et al.*, 2019), en tanto que otros pueden ser fáciles de pulverizar incluso con un mortero de ágata, como es el caso de las plantas medicinales o de algunas algas como el sargazo (López-Sosa, Alvarado-flores, *et al.*, 2020; Khallaf and El-Sebaii, 2022). Una vez pulverizadas las muestras de interés, se podrán realizar diferentes caracterizaciones que a continuación se describen. Este capítulo describe de manera general el funcionamiento de las técnicas de caracterización mencionadas, y se invita al lector a profundizar en ellas en libros especializados para este objetivo (Whan, 2004; Edwards, 2005; Egerton, 2005; Abidi, 2022).

Difracción de Rayos X

Esta es una de las técnicas de caracterización más utilizadas para el análisis de la estructural de materiales, es decir para conocer cómo se organizan los átomos que conforman cualquier material, en específico aquellos que tienen estructuras bien definidas y forman cristales. Es una prueba no destructiva y es la herramienta principal para la determinación de las fases de un material cristalino. El equipo que se utiliza para este análisis es conocido como difractómetro de rayos X, y funciona haciendo incidir rayos X que interactúan con la muestra que se analiza, la cual en ciertos casos genera rayos X que son conocidos como rayos difractados y son analizados por un detector especializado. El equipo procesa los rayos X que se generan después de la interacción con los átomos (Askeland, D. R., & Phulé, 2004). Para procesar los resultados es necesario hacer uso de patrones de referencia, es decir datos específicos de picos de difracción que ya se conocen y que se contrastan con los resultados. Esto se logra a través de un software o con el uso de tarjetas de que contienen información de ciertos compuestos, y que en ambos casos se comparan con los resultados obtenidos del análisis con el difractómetro de rayos X. La Difracción de Rayos X (DRX) provee información sobre estructuras de los materiales, organización de los átomos, tamaño de las partículas (Granos), entre otra información importante (Bunaciu, Udriștioiu and Aboul-Enein, 2015). Un ejemplo general de los resultados del difractómetro de rayos X se puede apreciar en la Figura 1, donde se muestran los patrones de DRX de grafito, óxido de grafeno y grafeno provenientes de un trabajo en donde se sintetizó grafeno por medio del método Hummers (Johra, Lee and Jung, 2014)

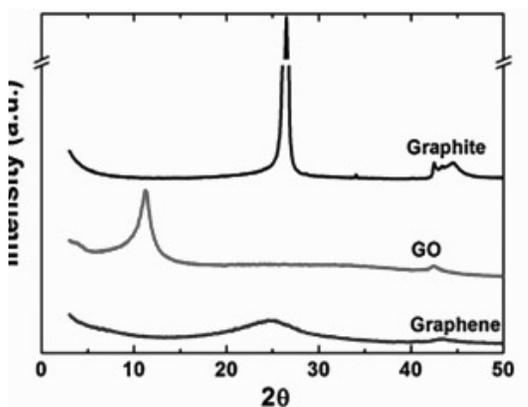


Figura 1. Comparación de los patrones de DRX de grafito, óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido (grafeno) (Johra, Lee and Jung, 2014).

Esta técnica aplicada a los recursos biomásicos, es útil para conocer por ejemplo el contenido de compuestos como la celulosa, hemicelulosa y lignina que son útiles en el estudio de biocombustibles sólidos (Morales-Máximo *et al.*, 2022), así como compuestos vinculados a biocombustibles del tipo líquido, como algunos carbohidratos. Esta técnica puede utilizarse como análisis base para conocer el contenido de ciertos compuestos en los recursos biomásicos.

Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica de caracterización esencial para determinar la estructura de la materia a escala molecular y es ampliamente usada para identificar los grupos funcionales en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Esta técnica permite conocer la composición química y el arreglo de enlaces de los constituyentes de un material (Salame, Pawade and Bhanvase, 2018). Las vibraciones moleculares de algunos materiales pueden ser identificadas para conocer los enlaces presentes en la muestra que se interesa analizar.

El equipo de FTIR típico consiste en una fuente de luz infrarroja (Energía electromagnética), un porta-muestras, un interferómetro, un detector, un amplificador y una computadora. La fuente de luz infrarroja genera radiación que pasa a través del interferómetro e incide en la muestra, para posteriormente llegar al detector. El amplificador amplía la señal y se convierte a una señal digital o interferograma. Finalmente, el interferograma es convertido en un espectro por medio del algoritmo de la transformada de Fourier (Kumar, 2018). Un equipo de espectroscopia infrarroja mide la absorción de la radiación infrarroja realizada por cada enlace en las moléculas y da como resultado un espectro de absorción (base de datos).

Mediante FTIR se pueden identificar grupos funcionales (Grupo de átomos responsable de las propiedades de la molécula) que se asocian a determinados compuestos presentes en la materia orgánica de los recursos biomásicos, al igual que difracción de rayos X pero desde la identificación de grupos funcionales es posible determinar la presencia de compuestos poliméricos de utilidad para el desarrollo de biocombustibles del tipo sólido. El resultado del análisis FTIR es un espectro que permite identificar bandas de transmitancia que son identificadas por el software del equipo y que también pueden analizarse con lo reportado en literatura especializada (Abidi, 2022).

Un ejemplo de los resultados de un análisis FTIR se aprecia en la Figura 2, donde se presentan los espectros de FTIR de dos muestras de nanopartículas de TiO_2 . Ambas muestras fueron obtenidas mediante el método sol-gel (Bagheri, Shamelí and Abd Hamid, 2013).

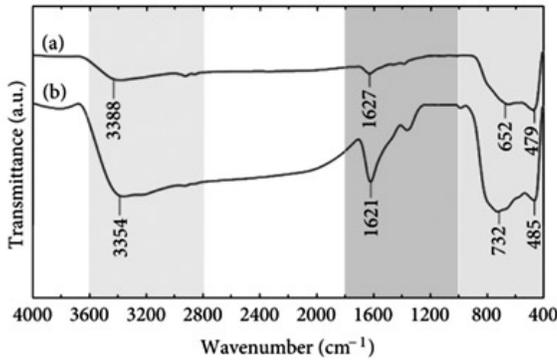


Figura 2. Espectros de FTIR de nanopartículas de titanía [5].

Algunas aplicaciones del análisis FTIR en biocombustibles del tipo sólidos se han reportado previamente y pueden ser consultados con mayor profundidad (López-Sosa, Alvarado-Flores, *et al.*, 2020; Morales-Máximo *et al.*, 2022; Morales-m *et al.*, 2023).

Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica posee la ventaja de producir imágenes de alta resolución, además de ofrecer un amplio rango de magnificación, generalmente en un rango de 10 – 500,000 veces para el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), equipo con el que se utiliza esta técnica. Esto permite la caracterización de microestructuras de distintos materiales a diferentes escalas, desde la microescala imperceptible para el ojo humano, hasta la nano-escala imperceptible para un microscopio óptico (Inkson, 2016).

Lo que la luz es útil para el microscopio óptico, los electrones son para el MEB. Adicionalmente, los electrones, al tener carga negativa, interactúan fuertemente

con los átomos de la muestra analizada, generando un amplio rango de fenómenos que emiten diferentes señales. Estas señales pueden ser detectadas y procesadas para obtener imágenes químicas de áreas específicas de la muestra. El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) es un instrumento versátil que se utiliza ampliamente para observar la morfología superficial de los materiales. En un equipo de MEB, la muestra es bombardeada con un haz de electrones de alta energía producido generalmente por un filamento de tungsteno, y los electrones y rayos X emitidos por esta interacción son analizados, lo que proporciona información sobre la topografía, morfología, composición, orientación de granos, cristalografía, etc., de un determinado material (Kumar, 2018).

En el caso de recursos biomásicos, el proceso de análisis por MEB, deberá considerar una muestra con el menor contenido de humedad posible y triturada requiriéndose para su estudio únicamente algunos miligramos de muestra que se colocarán en un porta-muestra y serán introducidos a una cámara de vacío donde se analizarán mediante detectores que registran las interacciones mencionadas del haz de electrones con la muestra de biomasa.

Un ejemplo del resultado de un análisis de MEB para residuos de biomasa forestal con aplicaciones de biocombustibles sólidos se muestra en la Figura 3.

Donde se puede apreciar la identificación de los residuos, su morfología y un análisis químico semicuantitativo del porcentaje en peso de los elementos presentes en los residuos de *Bursera cuneata* Schltld (Copalillo), que resulta de la fabricación de máscaras de madera en la comunidad de Tócuaro, Michoacán, México.

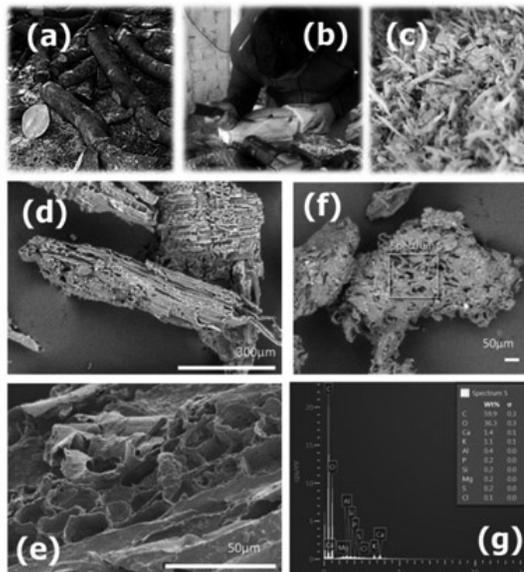


Figura 3. Proceso de generación de residuos de *Bursera cuneata* Schltld: (a) corte (b) fabricación de artesanías (c) acumulación de residuos. SEM: (d), (e) morfología (f) (g) análisis químico semicuantitativo (SEM-EDS) (Catillo-Tera *et al.*, 2023)

Espectroscopia Raman

La espectroscopía Raman es una de las técnicas de caracterización más sólidas y versátiles para analizar materiales, tanto en el laboratorio como en condiciones de campo (Kudelski, 2008). Un equipo de espectroscopía Raman está compuesto de una fuente de luz, un monocromador, un porta-muestras y un detector. Se usan diferentes láseres con diversas longitudes de onda (Energía electromagnética), algunos de los más comunes son He:Ne ($\lambda = 632.8$ nm), ion de argón (488.0 and 514.5 nm), y láser de diodos ($\lambda = 630$ y 780 nm). Un ejemplo del uso de esta técnica se muestra en la Figura 4, donde se aprecia un espectro Raman (Gráfica donde que resulta del procesamiento de los datos obtenidos del análisis) de residuos de *Zea mays* (Rastrojo), producto de una investigación para identificar el potencial energético de ese recurso. En este análisis fue posible identificar compuestos como glucosa y celulosa, compuestos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno (Morales-Máximo *et al.*, 2022).

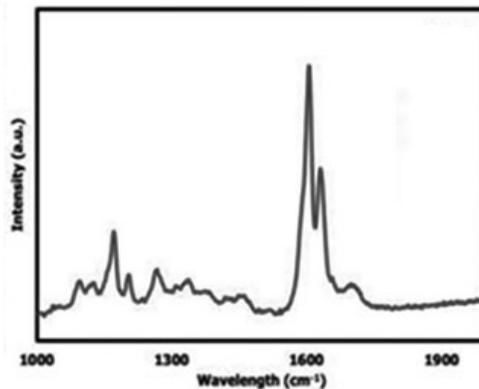


Figura 4. Espectro Raman de residuos de *Zea mays* (Morales-Máximo *et al.*, 2022).

Referencias

- Abidi, N. (2022) *FTIR Microspectroscopy: Selected Emerging Applications*, *FTIR Microspectroscopy: Selected Emerging Applications*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84426-4>.
- Askeland, D. R., & Phulé, P.P. (2004) *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Thomson.
- Bagheri, S., Shameli, K. and Abd Hamid, S.B. (2013) 'Synthesis and characterization of anatase titanium dioxide nanoparticles using egg white solution via Sol-Gel method', *Journal of Chemistry*, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1155/2013/848205>.

- Bunaciu, A.A., Udriștioiu, E. Gabriela and Aboul-Enein, H.Y. (2015) 'X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications', *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), pp. 289–299. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>.
- Catillo-Tera, O.A. *et al.* (2023) 'Electron Microscopy Characterization of *Bursera cuneata* Schltld Residues for its Application as Solid Biofuel', *Microscopy and microanalysis : the official journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada*, 29(1), pp. 88–89. Available at: <https://doi.org/10.1093/micmic/ozado67.036>.
- Edwards, H.G.M. (2005) *Modern Raman spectroscopy—a practical approach*. Ewen Smith and Geoffrey Dent. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 2005. Pp. 210. ISBN 0 471 49668 5 (cloth, hb); 0 471 49794 0 (pbk), *Journal of Raman Spectroscopy*. Available at: <https://doi.org/10.1002/jrs.1320>.
- Egerton, R.F. (2005) *Physical Principles of Electron Microscopy, Physical Principles of Electron Microscopy*. Springer. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39877-8>.
- Inkson, B.J. (2016) *Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization*. Elsevier Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>.
- Johra, F.T., Lee, J.W. and Jung, W.G. (2014) 'Facile and safe graphene preparation on solution based platform', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), pp. 2883–2887. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.11.022>.
- Khallaf, A.E.M. and El-Sebaili, A. (2022) 'Review on drying of the medicinal plants (herbs) using solar energy applications', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 58(8), pp. 1411–1428. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03191-5>.
- Kudelski, A. (2008) 'Analytical applications of Raman spectroscopy', *Talanta*, 76(1), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.02.042>.
- Kumar, J. (2018) *Photoelectron spectroscopy: Fundamental principles and applications, Handbook of Materials Characterization*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_12.
- Larios, I. *et al.* (2019) 'Introducción a La Tecnología Del Mango', *Introducción a la tecnología del mango*, pp. 9–10. Available at: <https://doi.org/https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/388/1/Libro%20Mango.pdf>.
- López-Sosa, L.B., Alvarado-Flores, J.J., *et al.* (2020) 'A prospective study of the exploitation of pelagic sargassum spp. As a solid biofuel energy source', *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10238706>.
- López-Sosa, L.B., Alvarado-flores, J.J., *et al.* (2020) 'A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp . as a Solid Biofuel Energy Source', *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10238706>.
- Morales-m, M. *et al.* (2023) 'Multifactorial Assessment of the Bioenergetic Potential of Residual Biomass of *Pinus* spp . in a Rural Community : From Functional

- Characterization to Mapping of the Available Energy Resource’.
- Morales-Máximo, C.N. *et al.* (2022) ‘Characterization of Agricultural Residues of Zeamays for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico’, *Energies*, 15(19), p. 6870. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15196870>.
- Salame, P.H., Pawade, V.B. and Bhanvase, B.A. (2018) *Characterization tools and techniques for nanomaterials, Nanomaterials for Green Energy*. Elsevier Inc. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813731-4.00003-5>.
- Tiwari, G., Sharma, A. and Sharma, S. (2016) ‘Saccharification of Mango peel wastes by using microwave assisted alkali pretreatment to enhance its potential for bioethanol production’, *World Renewable Energy Technology Congress.*, pp. 1–11.
- Whan, R.E. (2004) *Materials Characterization*. Third. United States of America: ASM International.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS PROXIMAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS: HUMEDAD, MATERIA VOLÁTIL, CENIZAS Y CARBONO FIJO

LUIS FERNANDO PINTOR-IBARRA*
FERNANDO DANIEL MÉNDEZ-ZETINA
JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA-QUIÑONES
JOSÉ JUAN ALVARADO-FLORES

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, C.P.58040, Morelia, México. *Autor de correspondencia, e-mail: luis.pintor@umich.mx

Resumen

El análisis proximal de los biocombustibles sólidos como madera, carbón vegetal, pélets, briquetas y otros materiales lignocelulósicos, permiten obtener un perfil sobre la calidad de estos combustibles para su posible comercialización y diseño de los equipos para su combustión. En este capítulo se abordan las metodologías para determinar el contenido de humedad, análisis proximal, cenizas y carbono fijo, basadas en normas internacionales. Se concluye que los análisis proximales ayudan a determinar la calidad de los biocombustibles sólidos para su comercialización, en contraste, si no cumplen con las estandarizaciones podrán utilizarse de forma local.

Palabras clave: briquetas, pélets, biomasa, materiales lignocelulósicos, poder calorífico.

Introducción

La biomasa es la materia orgánica generada en los procesos biológicos, y al alcance del hombre, ha sido utilizada con fines energéticos desde el descubrimiento del fuego (Velázquez, 2018). La biomasa se puede transformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles (leña, carbón vegetal, pélets, briquetas, bioetanol, biodiesel, biogás, otros), que se obtienen de la transformación física, química, térmica o microbiana de la biomasa. Actualmente, la bioenergía es la principal fuente de energía renovable; representa alrededor del 10% del uso de energía global y el 77% de todas las renovables (biocombustibles, hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica). La mayor parte de la bioenergía proviene de biocombustibles sólidos que representan más del 80% de la demanda total (Masera y Sacramento, 2022). Sin embargo, la biomasa es una fuente de energía renovable que presenta gran heterogeneidad estructural, anatómica y química (Bustamante *et al.*,

2016). Por lo tanto, es de suma importancia el conocimiento de sus características físicas, químicas, proximales, y energéticas de las distintas fuentes de biomasa (Alvarado y Rutiaga, 2018). En este capítulo se abordará el tema del análisis proximal, estos métodos son los más utilizados para la caracterización de los biocombustibles sólidos; comprenden la determinación del porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas, y carbono fijo (García *et al.*, 2012). En este sentido, para poder estandarizar, clasificar y dar garantía de la calidad de los biocombustibles sólidos en base a su fuente de origen es necesario realizar los análisis proximales basados en normas internacionales (Francescato *et al.*, 2008).

Humedad

La determinación del contenido de agua en los materiales lignocelulósicos es un aspecto de suma importancia que comprenden las propiedades energéticas de la biomasa y en otros sistemas de conversión física y química de los materiales lignocelulósicos. La humedad de la biomasa verde siempre es alta, presentando valores de entre 50% y 300% basados en peso anhidro (ecuación 1). La biomasa expuesta al ambiente alcanzará valores cercanos al 30% (contenido de humedad en equilibrio). El contenido de humedad de los materiales lignocelulósicos está influenciado por la humedad atmosférica y puede variar incluso en un mismo día y a diferentes horas. El contenido de humedad de la biomasa es un factor importante que influye directamente en magnitud de parámetros importantes de los biocombustibles como; masa, densidad, y principalmente en el poder calorífico (Núñez-Retana *et al.*, 2019). El porcentaje de humedad de los diferentes materiales lignocelulósicos es muy variable debido a su naturaleza higroscópica. Por ejemplo, distintas biomasa colectadas y caracterizadas en el territorio mexicano donde se reportan rangos de 1.59 a 15.91 % de humedad (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). Una de las metodologías utilizadas para determinar el contenido de humedad de los biocombustibles sólidos es mediante el método gravimétrico basado en la norma UNE-EN ISO 18134-1 (2015), con base a las siguientes ecuaciones donde: CHh (%); contenido de humedad en base a peso húmedo, CHa (%); contenido de humedad en base a peso anhidro, Ph; peso de la muestra húmeda, Pa; peso de la muestra anhidra.

$$CHa (\%) = \frac{Ph - Pa}{Pa} \times 100 \quad (1)$$

$$CHh (\%) = \frac{Ph - Pa}{Ph} \times 100 \quad (2)$$

Material volátil

La materia volátil se determina mediante la pérdida de masa, menos la debida humedad, cuando se calienta el biocombustible sólido sin contacto con el aire bajo condiciones normalizadas (UNE-EN ISO 18123, 2015). De acuerdo con la literatura la materia volátil, es la fracción que se transforma en gas en el proceso de combus-

ción, se libera cuando la biomasa se calienta de 200°C a 500°C (Velázquez, 2018). Esta fracción se puede subdividir en hidrocarburos ligeros, alquitrán, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y agua (García et al., 2012). Diversas investigaciones sobre el análisis proximal de distintos materiales lignocelulósicos han reportado valores para biomasa que oscilan entre 61.2 a 90.5% y para carbón vegetal de 28.40 a 34.25% (Ruiz-Aquino et al., 2019; Rutiaga-Quiñones et al., 2020). A continuación, se describe la ecuación matemática para determinar el porcentaje de material volátil de la biomasa por gravimetría, tras un proceso de pirólisis con un calentamiento hasta 900 ±10 °C, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 18123 (2015), con base a las siguientes ecuaciones donde: A; materia perdida durante la pirolisis, Pi; peso inicial de la muestra más crisol con tapa, P; peso del residuo después del calentamiento más crisol, Pa; peso inicial de la muestra.

$$\% \text{Materia perdida durante la pirólisis} = A = \frac{P_i - P}{P_a} \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Materia volátil} = \% A - \% \text{ humedad.} \quad (4)$$

Cenizas

El contenido de cenizas es un importante parámetro para considerar en la selección de una biomasa como combustible, porque la ceniza es un subproducto de la combustión y se puede considerar como contaminante ambiental, que termina como ceniza de fondo o ceniza volante y necesita eliminarse. La ceniza puede depositarse o usarse para la producción de otros productos y el conocimiento de cómo la ceniza llega a un combustible puede tener consecuencias económicas. Además, la composición química de la ceniza contribuye a la escorificación y corrosión en el equipo de combustión y es por tanto importante, el conocimiento de la cantidad de ceniza contenida en un combustible (UNE-EN ISO 18122, 2015). También, permite determinar la cantidad de residuos generados en el proceso de combustión y es útil para el diseño de equipos de combustión de biomasa (Velázquez, 2018). Los principales elementos inorgánicos presentes en los biocombustibles sólidos son: Ca, K, P, Mg, Na, Al, Cl, Fe, S, Mn, Si y Ti (Vassilev et al., 2017). El contenido de las sustancias inorgánicas es una característica importante de un biocombustible sólido (Oberberger y Thek 2010). El contenido de cenizas se calcula por el porcentaje que representa el peso de la muestra calcinada a 550 °C y el peso de la muestra anhidra de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 18122 (2015) y con base a las siguientes ecuaciones donde: PaM; peso anhidro de la muestra de biomasa, Ph; peso húmedo, %H; porcentaje de humedad, PaCe; peso anhidro de cenizas más crisol, Pac; peso anhidro del crisol

$$\text{Determinación del peso anhidro de la muestra} = PaM = Ph \left(1 - \frac{\%H}{100} \right) \quad (5)$$

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{PaCe - PaC}{PaM} \times 100 \quad (6)$$

Carbono fijo

El carbón fijo es la masa de la materia orgánica restante, después de que se libera el material volátil y la humedad, se le considera el componente de mayor importancia energética. Se puede determinar usando algunos datos obtenidos previamente del análisis proximal en base a la ecuación 7 (García et al., 2012). En la literatura se han reportado rangos de carbono fijo en biomasas que oscilan de 3.44 a 23.1%, en carbón vegetal de 62.61 a 70.36 % (Ruiz-Aquino et al., 2019; Rutiaga Quiñones et al., 2020).

$$\% \text{ Carbón fijo} = 100 - (\% \text{ Cenizas} + \% \text{ Materia volátil}). \quad (7)$$

Conclusión

Los análisis proximales permiten obtener un perfil inmediato sobre la calidad de los biocombustibles sólidos, de materias primas como: la madera y los subproductos de su transformación primaria en sus diversos tamaños físicos: astillas, virutas, aserrín corteza, leña, etc., y los densificados que comprenden los pellets y briquetas elaborados de diversas biomasas, el carbón vegetal y otros materiales lignocelulósicos. Estas caracterizaciones son importantes para su comercialización y el diseño de los equipos de combustión, sustentadas en estandarizaciones internacionales. Sin embargo, si los biocombustibles sólidos no cumplen con los aspectos técnicos pueden utilizarse de forma local, para uso doméstico como la cocción de alimentos, calefacción, o de forma industrial en la generación de energía a través de las calderas que usan biomasa como combustible.

Referencias

- Alvarado Flores, J. J., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(2), 221-238.
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5-23.
- Francescato, V., Antonini, E., Bergomi, L. Z., Metschina, C., Schnedl, C., Krajnc, N., Kosciak, K., Nocentini, G., & Stranieri, S. (2008). Manual de combustibles de madera producción requisitos de calidad comercialización. *AIEL Italian Agroforestry Energy Association*.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource technology*, 103(1), 249-258.
- Masera, O., & Sacramento Rivero, J. C. (2022). Promoting a sustainable energy transition in Mexico: The role of solid biofuels. *BioEnergy Research*, 15(4), 1691-1693.

- Núñez-Retana, V. D., Escobedo-Bretado, M. A., Quiñones-Reveles, M., Ruiz-Aquino, F., and Carrillo-Parra, A. (2019). Efecto del contenido de humedad sobre pélets de aserrín de madera de *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2), 136-144.
- Obernberger, I., Thek, G. (2010) *The pellet handbook* (1st ed.). London-Washington DC: Earthscan.
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Santiago-García, W., Fuente-Carrasco, M. E., Sotomayor-Castellanos, J. R., & Carrillo-Parra, A. (2019). Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Research*, 64(1), 71-82.
- Rutiaga-Quñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., Gonzalez-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., & Lujan-Alvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529.
- UNE-EN ISO 18122 (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas*. Madrid, España: AENOR; 2015.
- UNE-EN ISO 18123 (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil*. Madrid, España: AENOR; 2015
- UNE-EN ISO 18134-1 (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia*. Madrid, España: AENOR.
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Song, Y. C., Li, W. Y., & Feng, J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid bio-fuel combustion. *Fuel*, 208, 377-409.
- Velázquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Editorial Universitat Politècnica de València.

CAPÍTULO 6

CARACTERIZACIÓN ELEMENTAL DE LA BIOMASA CON UN ENFOQUE EN SU POTENCIAL ENERGÉTICO

FERNANDO DANIEL MENDEZ-ZETINA*
LUIS FERNANDO PINTOR-IBARRA
JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA- QUIÑONES
JOSÉ JUAN ALVARADO-FLORES

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, C.P.58040, Morelia, México. *Autor de correspondencia, e-mail: 1614346@umich.mx

Resumen

El análisis elemental es esencial para cuantificar carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en la biomasa, influyendo en su calidad y potencial energético. Durante la combustión, el carbono y el hidrógeno se oxidan, formando CO_2 y agua, afectando el poder calorífico. El oxígeno indica el grado de oxidación, especialmente en la formación de óxidos de nitrógeno, pudiendo reducir el poder calorífico. El nitrógeno en la biomasa puede causar emisiones nocivas, y es crucial limitar cloro y azufre para evitar problemas ambientales y daños en equipos de combustión. Conocer la composición elemental es esencial para comprender las reacciones, liberación de calor y productos durante la combustión

Palabras clave: análisis último, método Kjeldahl, biomasa, biocombustibles, CHONS.

Introducción

La técnica de análisis elemental permite cuantificar carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en diversas muestras, ya sea de origen orgánico o inorgánico, en estados sólidos o líquidos (ICB, 2016). El término “biomasa” se refiere a toda la materia orgánica, viva o muerta, originada por fotosíntesis de plantas o animales, directa o indirectamente. Es esencial señalar que la biomasa excluye carbón, petróleo y restos fosilizados. Este material constituye la forma más abundante en la Tierra, estimándose alrededor de 550 a 560 mil millones de toneladas de carbono en forma de biomasa (Pocha *et al.*, 2023). En otro sentido, la utilización de biomasa como fuente de energía ofrece una ventaja significativa al contribuir de manera considerable a la disminución de las emisiones de CO_2 en contraste con el empleo de hidrocarburos. Esta característica resulta en una reducción sustancial del im-

pacto adverso que los combustibles fósiles ejercen sobre el cambio climático (Callejas y Quezada, 2009). La biomasa está compuesta principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno, aunque en ocasiones pueden estar presentes en proporciones menores nitrógeno y azufre. Estos elementos tienen un impacto significativo en la calidad de la biomasa como combustible (Raju *et al.*, 2014).

Según Rutiaga-Quñones *et al.* (2020), es esencial comprender detalladamente la composición elemental de la biomasa, especialmente cuando se piensa en su aplicación para la generación de energía. Esta información permite entender las reacciones en la combustión, así como identificar reactivos, productos y la cantidad de calor liberado. Consultar la tabla 1 proporciona detalles relevantes sobre la composición elemental de la biomasa con propósitos energéticos.

TABLA 1. PARÁMETROS TÉCNICOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL EN LA BIOMASA DE ACUERDO A NORMAS PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS Y EFECTOS EN LA INDUSTRIA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Ensayo	Técnicas de análisis	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los Biocombustibles
Análisis elemental	<p>El análisis de carbono, hidrógeno y nitrógeno se determina en base a la norma UNE-EN ISO 16948 (2015), mientras que el contenido de oxígeno se determina por diferencia según Ghetti <i>et al.</i> (1996).</p> <p>Para azufre y cloro, se utiliza la norma UNE-EN ISO 16994 (2017).</p> <p>El método Kjeldahl, es crucial en la agroalimentaria y farmacéutica, comprende tres fases: digestión, destilación y valoración del amoníaco (Sáez <i>et al.</i>, 2013).</p>	<p>S < 0.08 % N < 0.3% ¹</p> <p>S < 0.03 % N ≤ 0.5% ²</p> <p>N: 0.10 a 0.50% ³</p>	<p>Durante la combustión, tanto el carbono (C) como el hidrógeno (H) experimentan oxidación a través de reacciones exotérmicas, dando lugar a la formación de dióxido de carbono (CO₂) y agua, lo cual influye en las propiedades del combustible (Oberberger y Thek, 2004). El oxígeno desempeña un papel crucial como indicador del grado de oxidación en diversos procesos, especialmente en la generación de óxidos de nitrógeno liberados durante la combustión de gases. La presencia elevada de oxígeno puede resultar en una disminución del poder calorífico del combustible (Calventus <i>et al.</i>, 2009). Las variedades de biomasa herbácea exhiben un contenido de carbono inferior en comparación con las variantes de biomasa leñosa, lo que tiene un impacto directo en su poder calorífico bruto. En consecuencia, se observa un poder calorífico bruto más elevado en la biomasa leñosa (Oberberger y Thek, 2004). De acuerdo con Oberberger y Thek (2004), en casos donde las muestras presentan concentraciones elevadas de nitrógeno, su utilización se vinculará directamente con sustancias prohibidas durante el proceso de densificación de la biomasa, ya que esto conduce a un incremento en las emisiones de NOx.</p> <p>Es esencial limitar la presencia de contaminantes químicos, como cloro (Cl) y azufre (S), en la materia prima o aditivos, ya que pueden tener efectos perjudiciales en el proceso de combustión. Concentraciones elevadas de estos elementos pueden generar emisiones problemáticas, como HCl y SOx, además de propiciar la formación de depósitos y la corrosión en los equipos de combustión (Oberberger y Thek, 2004).</p>
<p>¹ÖNORM M 7135 (2000), ² EN 14961-2 (2011), ³ISO 17225-2 (2014)</p>			

Conclusión

El análisis elemental CHONS en la biomasa es esencial para comprender su composición química, fundamental en su aplicación como recurso renovable para la producción de energía. Al determinar con precisión las cantidades de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, se logra una comprensión detallada de las reacciones en la combustión, identificando reactivos, productos y la cantidad de calor liberado. Este conocimiento permite diseñar tecnologías eficientes y sostenibles para aprovechar la biomasa como fuente de energía, evaluando tanto la viabilidad económica como ambiental de proyectos relacionados con su utilización.

Referencias

- Calventus, Y. A., R. Carreras, M. Casals, P. Colomer, M. Costa, A. Jaén, S. Monseerrat, A. Olivia, M. Quera y X. Roca. (2009). *Tecnología Energética y Medio Ambiente* - I. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 190 p.
- Callejas, E. S., y Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157), 75-82.
- EN 14961-2. (2011). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: pélets de madera para uso no industrial*. AENOR, Madrid, España.
- Ghetti, P., Ricca, L., y Angelini, L. (Abril de 1996). Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, 75(5), 565-573.
- ICB (Instituto de Carboquímica). (2016). Análisis Inmediato, Elemental y Poder Calorífico. Consultado el 12 de diciembre de 2023. <https://www.icb.csic.es/servicio-de-analisis/caracterizacion-decombustibles/analisis-inmediato-elemental-poder-calorifico-y-tipos-de-azufre/>
- ISO 17225-2 (2014). “*Biocombustibles sólidos: especificaciones y clases de combustible*”, Organización Internacional de Normalización, Ginebra, Suiza.
- Obernberger, I., y Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy* (27), 653–669.
- ÖNORM M 7135 (2000). *Compressed wood or compressed bark in natural state-pellets and briquettes, requirements and test specifications*. Vienna, Austria: Österreichisches Normungsinstitut.
- Pocha, C. K. R., Chia, W. Y., Kurniawan, T. A., Khoo, K. S., y Chew, K. W. (2023). Thermochemical conversion of different biomass feedstocks into hydrogen for power plant electricity generation. *Fuel*, 340, 127472.
- Raju, C. A., Jyothi, K. R., Satya, M., y Praveena, U. (2014). Studies on development of fuel briquettes for household and industrial purpose. *International Journal of research in Engineering and Technology*, 3(2), 54-63.
- Rutiaga-Quiñones, J. G. Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruiz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J., y

- Lujan-Álvarez C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *Bioresources* 15(4), 8529-8553.
- Sáez-Plaza, P., Navas, MJ, Wybraniec, S., Michałowski, T., y Asuero, AG (2013). An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part II. Sample preparation, working scale, instrumental finishing and quality control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43 (4), 224-272.
- UNE-EN ISO 16948 (2015). *Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno*. AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN ISO 16994 (2017). *Determinación del contenido total de azufre y cloro (ISO16994:2016)*. AENOR, Madrid, España.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE SUSTANCIAS INORGÁNICAS EN LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA-QUIÑONES*
LUIS FERNANDO PINTOR-IBARRA
FERNANDO DANIEL MÉNDEZ-ZETINA
JOSÉ JUAN ALVARADO-FLORES

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica S/N, Edificio “D”, Ciudad Universitaria. C.P.58040, Morelia, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: rutiaga@umich.mx

Resumen

La madera, en general contiene baja concentración de ceniza, material que queda después de un proceso de combustión; valores para coníferas fluctúan de 0.1 a 1.0%, mientras que en latifoliadas suele haber valores ligeramente mayores. En otros materiales lignocelulósicos se ha detectado mayor cantidad de cenizas (10 a 22%). En la ceniza, pueden estar presentes diferentes sustancias inorgánicas. Para la identificación de los compuestos inorgánicos, presentes en madera, otros materiales lignocelulósicos u otros materiales como las rocas, se han utilizado las llamadas técnicas de química húmeda, o más recientemente los métodos o técnicas instrumentales.

Palabras clave: sustancias inorgánicas, análisis químico húmedo, análisis instrumental, XRF, ICP-AES.

Síntesis

El suelo es un sistema formado por sólidos (orgánicos e inorgánicos), agua, aire y microorganismos, en el cual crecen las plantas, y en él ocurren reacciones que se ven afectadas por factores, como la energía derivada del proceso fotosintético, clima, cambio de gases con la atmósfera y por la composición mineral del suelo (Ortega-Torres, 1981). Mediante el proceso de fotosíntesis se sintetizan carbohidratos, y este proceso juega un rol importante en la producción de materia orgánica no fosilizada, o sea la biomasa (Ortega-Torres, 1981; Velázquez-Martí, 2018).

Un ejemplo de biomasa es la biomasa lignocelulósica, formada por celulosa, hemicelulosas, lignina, sustancias extraíbles y sustancias inorgánicas (Fengel y Wegener, 1983), y que procede de los sistemas forestales, de diversas especies de árboles, así como de restos y residuos derivados del aprovechamiento de la madera

(Velázquez-Martí, 2018). El análisis último de la madera refleja en promedio 50% de carbono, 43% de oxígeno y 6 % de hidrógeno, y el resto corresponde a nitrógeno y sustancias inorgánicas; por su parte, el contenido de cenizas en maderas de clima templado varía de 0.1 a 1.0% y en maderas latifoliadas suele ser mayor (Fengel y Wegener, 1983).

Existen diferentes técnicas o métodos usados para identificar la composición inorgánica en plantas, que han sido útiles en tecnología de la madera, forestería, agronomía, biología, nutrición, fisiología y genética, además de suelos y abonos para los cultivos, y en otras áreas.

Análisis por química húmeda. También es conocido como análisis por vía húmeda e implica la identificación y la cuantificación de los elementos químicos presentes en una muestra, y se puede dividir en análisis cualitativo (Brumblay, 1983) y análisis cuantitativo (Ayes 1970). La técnica conocida como marcha de cationes o análisis de cationes ayuda a la separación de 24 cationes. Aunque la separación de los iones negativos presentes en una muestra no es tan sistemática como en el caso de la separación de cationes, sí se deben aplicar procedimientos que ayuden a investigar la presencia de todos los aniones. De los 30 o 40 iones negativos comunes, 18 son los más representativos (Nordmann, 1979). Otros experimentos especiales son: a) Perlas de bórax, b) Pruebas a la flama, c) Fluorescencia, d) Uso de ditizona, e) Microscopía.

Técnicas instrumentales analíticas. Para el análisis de las sustancias minerales se ha pasado de las técnicas tradicionales a las técnicas instrumentales a mediados del siglo pasado (Murfunin, 1995; Ostrooumov, 1999). El instrumental moderno tiene mejores posibilidades para la conocer la composición elemental de las sustancias minerales sobre los métodos o técnicas tradicionales (Ostrooumov, 2009). Algunas técnicas usadas en el análisis de sustancias inorgánicas procedentes de materiales lignocelulósicos son las siguientes: Espectrometría de Absorción Atómica, que suele llamarse también como Análisis de Absorción Atómica (AAA, por sus siglas en inglés) (Ostrooumov, 2009), Espectroscopía de Emisión Atómica (AES) (Uden, 1992), Espectrometría de Emisión de Llama (FAES) (Rolka et al., 2023), Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) (Dahlquist et al., 1978), Espectroscopía de Emisión Atómica de Chispa y Arco (Ostrooumov, 2009; Harvey, 2023), Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) (Ostrooumov, 2009), Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) (Raja y Barron, 2023), Espectrometría de Fotoemisión de Rayos X (XPS) (Padilla-Cuevas et al., 2020), Análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF) (Ostrooumov, 2009; Padilla-Cuevas et al., 2020), Espectrometría de Emisión de Rayos X Inducida por Partículas (PIXE) (Padilla-Cuevas et al., 2020) y Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) (Padilla-Cuevas et al., 2020).

Además de los método o técnicas vistas anteriormente, existen también los métodos cromatográficos, que son útiles para separar compuestos orgánicos, pero también sustancias inorgánicas (Schwedt, 1994; Smith y Feinberg, 1979; Chen et al., 2007).

Influencia de los Elementos Químicos en la Combustión. El contenido de ceniza es relativamente bajo en biomasa lignocelulósica, pero es importante tenerlo en cuenta al combustionar la biomasa, y también es importante conocer su composición mineral, ya que altas concentraciones de cenizas afectan negativamente la eficiencia y el proceso de combustión (Fengel y Wegener, 1983; Bhatt y Todaria, 1992; Obernberger y Thek, 2010) y también el poder calorífico (Bridgeman et al., 2008)).

Referencias

- Ayres, G. H. (1970). *Análisis Químico Cuantitativo*. 2ª edición. HARLA, S. A. de C. V.
- Bhatt, B.P. and Todaria, N.P. (1992). Fuelwood characteristics of some Indian mountain species. *Forest Ecology and Management*, 47(1), 363-366.
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I. and Williams, P. T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion Properties. *Fuel*, 87(6), 844–856.
- Brumblay, R. U. (1983). *Análisis Cualitativo*. 13ª impresión. CECSA.
- Chen, S. F., Mowery, R. A., Scarlata, Ch. J. and Chambliss, C. K. (2007). Compositional Analysis of Water-Soluble Materials in Corn Stover. *J. Agric. Food Chem.*, 55, 5912-5918.
- Dahlquist, R. L. and Knoll, J. W. (1978). Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry: Analysis of Biological Materials and Soils for Major, Trace, and Ultra-Trace Elements. *Applied Spectroscopy*, 32(1), 1-30.
- Fengel, D. and Wegener, G. (1983). *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter & Co.
- Harvey, D. (2023). *Instrumental Analysis*. DePauw University. LibreTexts.
- Murfunin, A. S. (1995). *Advanced Mineralogy: Composition, structure and properties of mineral matter (concepts, results and problems)*. Vol. 1. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York.
- Nordmann, J. (1979). *Análisis Cualitativo y Química Inorgánica*. 13ª impresión. CECSA.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2010). *The pellet handbook*. 1st ed. London-Washington DC: Earthscan.
- Ortega-Torres, E. (1981). *Química de suelos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ostrooumov, M. (1999). *Técnicas analíticas en la investigación de minerales*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ostrooumov, M. (2009.) *Mineralogía Analítica Avanzada*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Padilla-Cuevas, J., Yee-Madeira, H. T., Merino-García, A., Hidalgo, C., and Etchevers, J. D. (2020). Analysis of essential and toxic mineral elements in plant tissue. *Agrociencia*, 54, 413-434.
- Raja, P. M. V. and Barron, A. R. (2023). *1.5: Análisis ICP-AES de Nanopartículas*. Rice University via OpenStax CNX. LibreTexts platform.
- Rolka, E., Żołnowski, A. C., Wyzkowski, M., Zych, W. and Skorwider-Namiołko,

- A. (2023). Wood Biomass Ash (WBA) from the Heat Production Process as a Mineral Amendment for Improving Selected Soil Properties. *Energies*, 16, 5110.
- Schwedt, G. (1994). *Cromatographische Trennmethode*n. 3. Erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag.
- Smith, I. y Feinberg, J. G. (1979). *Cromatografía sobre papel y capa fina*. Electroforesis. Editorial Alhambra.
- Uden, P. C. (1992). *Elemento específico cromatográfico detección por espectrometría de emisión atómica*. Columbus, OH: Sociedad Americana de Química.
- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la Biomasa Para Uso Energético*, 2nd ed.; Editorial Reverté, Universitat Politècnica de València.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO APLICADO A LA CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

JOSÉ JUAN ALVARADO-FLORES^{1*}
MARÍA LILIANA ÁVALOS-RODRÍGUEZ²
JORGE VÍCTOR ALCARAZ-VERA³
JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA-QUIÑONES¹
LUÍS FERNANDO PINTOR-IBARRA¹

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, C.P. 58040, Morelia, México.

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

³ Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, C.P. 58000, Morelia, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: jjalvarado@umich.mx

Resumen

Hoy en día, es primordial el uso de los residuos agroforestales para la generación y optimización de energía. El análisis TGA-DTG, permite medir simultáneamente la temperatura, el tiempo y la masa de una muestra en una atmósfera dinámica controlada permitiendo la determinación de las características de pérdida másica, su cinética de reacción asociada, así como los principales parámetros termodinámicos de la biomasa.

Palabras clave: materiales lignocelulósicos, análisis TGA-DTG, cinética, modelación matemática, análisis termodinámico.

Introducción

El análisis termogravimétrico (TGA), es una técnica experimental donde se realiza el análisis del cambio másico de algún material, ya sea orgánico o inorgánico, respecto del tiempo y temperatura, este es el fundamento de la técnica y en este sentido, se considera como un análisis térmico. La figura 1 ilustra un esquema de equipo TGA.

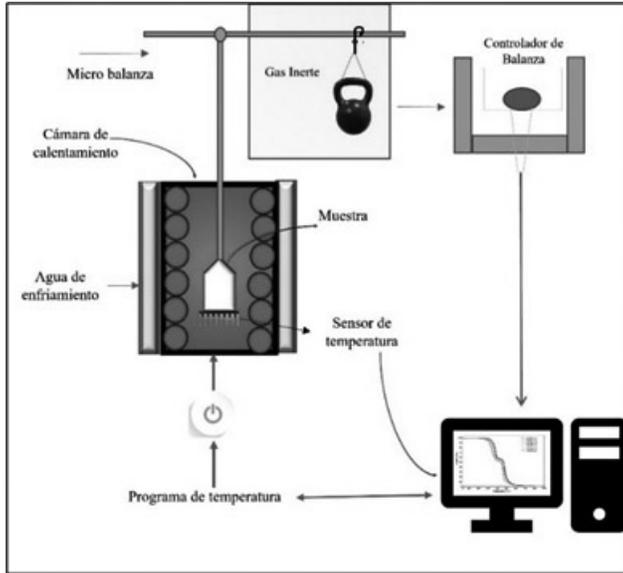


Figura 1. Diagrama general de un analizador termogravimétrico (*elaboración propia*).

Un aspecto importante es el gas (N_2 , Ar, He) que se utilice en el experimento, el cual puede tener un carácter oxidante, reactivo o inerte. A medida que se realiza el experimento, se obtiene una gráfica conocida como termograma. Tal gráfica permite la visualización de la temperatura o el tiempo en el eje horizontal, y del porcentaje de la pérdida másica en el eje vertical (parte izquierda). Generalmente es necesario analizar la velocidad con la que cambia tal pérdida de masa respecto al tiempo y/o temperatura (DTG).

La optimización de la degradación biomásica se puede lograr mediante el análisis de los parámetros cinéticos y termodinámicos con la finalidad de generar productos de alto valor agregado como el hidrógeno con aplicación en celdas de combustible (Alvarado *et al.*, 2022).

Generalidades sobre análisis termogravimétrico (TGA)

Clasificación de equipos para TGA

Tal como se muestra en la figura 2, de manera general y de acuerdo a la ubicación del porta muestras, los equipos de termobalanzas pueden tener la disposición de la carga de manera superior, suspendida y/o horizontal (Auroux, 2013, Gallagher y Brown, 2003).

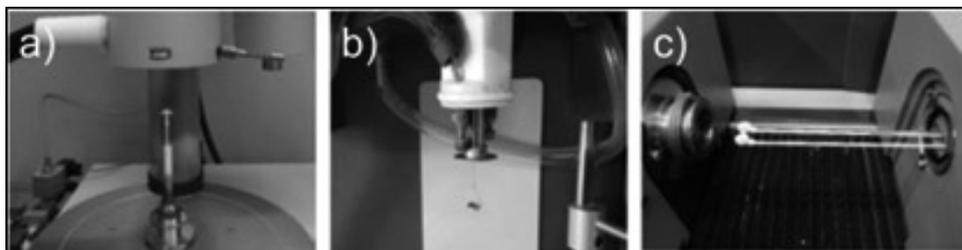


Figura 2. Clasificación de termobalanzas, a) superior, b) suspendida y c) horizontal (Auroux, 2013).

Características de las muestras para análisis TGA

Generalmente, es más recomendable una muestra pequeña entre 400-450 micras (Alvarado *et al.*, 2020). No todos los equipos admiten la misma cantidad, generalmente se pueden aceptar cargas de 10, 1.0, y 0.1 gramos, aunque existen equipos que pueden aceptar hasta decenas de gramos. Lo anterior cobra mayor importancia cuando se requiere el análisis de materiales muy heterogéneos (Bensharada, 2022). Las muestras de masa pequeña pueden proteger la termobalanza en caso de algún incidente térmico de carácter exotérmico (Craig y Reading, 2006).

Medición de la temperatura de la muestra y termobalanza

En los análisis TGA, es muy frecuente que exista la duda de tomar la temperatura de la muestra o del equipo para posteriores cálculos como en los de cinética del proceso térmico. En este caso es necesario saber cuánta muestra se emplea y en qué forma mide el equipo la temperatura de la muestra. A pesar de no ser muy fiable, en equipos TGA que emplean muestras grandes, de hasta decenas de gramos, la temperatura de la muestra se mide mediante un termopar incrustado en la muestra. En equipos TGA analíticos lo habitual es emplear muestras pequeñas (mg). En este sentido se recomienda hacer mediciones de temperatura separando el horno y la muestra, por lo tanto, también se debe tener cuidado al seleccionar el tipo de termopar. De manera general los termopares se clasifican en tipo B (1700°C), E (430°C), J (370°C), K (870°C) y T (200°C), que corresponden a elementos y/o aleaciones de platino-rodio, níquel, hierro, níquel-cromo y cobre respectivamente (Gallagher y Brown, 2003).

Calibración de la masa y temperatura en análisis TGA

Respecto a la masa, existen normas de estandarización y se pueden clasificar por ejemplo en clase S (100mg) o S-1, donde se considera un máximo de tolerancia de 0.025 mg para el primer tipo, y el doble para el segundo (Gallagher, 1997).

Para la calibración de la temperatura, la técnica de los puntos de Curie es muy utilizada para este fin, la cual consiste en la reducción de la fuerza magnética a

valores prácticamente de cero, generando una aparente pérdida de masa de algún material ferromagnético utilizado, que es calentado hasta que pierde tal propiedad magnética. Otra forma es el cálculo del DTG (Brown *et al.*, 1994). El método “eslabón-fusible” es otra alternativa (Vyazovkin *et al.*, 2010, Vyazovkin *et al.*, 2020).

Reporte de resultados del análisis TGA-DTG

Para la gráfica de TGA se considera en el eje horizontal las variables de temperatura y/o tiempo, y la degradación másica en el eje vertical. Cuando se desea hacer la comparación en datos normalizados, conviene mostrar la masa en porcentaje. Por otro lado, si se considera en el eje horizontal al parámetro tiempo, es recomendable graficar paralelamente otra curva de la variación de temperatura y su comportamiento en el tiempo. La figura 3 y 4, muestra un ejemplo del análisis termogravimétrico y diferencial de biomasa marina (Alvarado *et al.*, 2022).

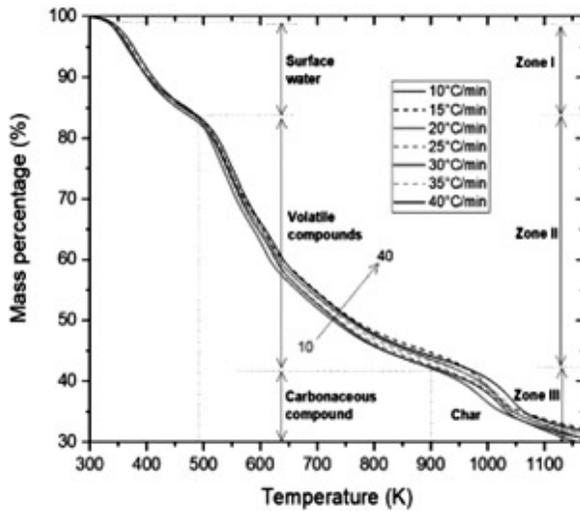


Figura 3. Curvas del análisis termogravimétrico biomasa marina en nitrógeno (Alvarado *et al.*, 2022).

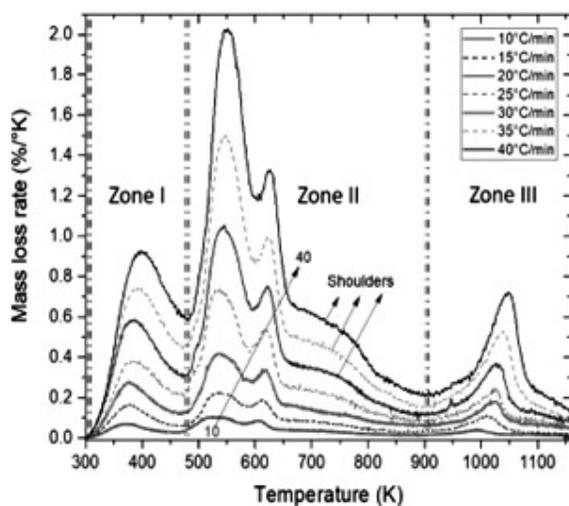


Figura 4. Curvas del análisis diferencial de biomasa marina en nitrógeno (Alvarado *et al.*, 2022).

Cabe mencionar que tanto las curvas de TGA como las de DTG, pueden representarse también en la misma gráfica, esto no es muy conveniente en análisis donde se incluyen un número considerable de rampas de calentamiento, a menos que se requiera observar la evolución a diversas velocidades de calentamiento (ver figura 4).

Derivado del tratamiento de los datos de TGA, es posible trabajar con correlaciones empíricas, modelos y software matemático para la determinación no solo de los parámetros antes mencionados, sino también de los constituyentes primarios de la biomasa como hemicelulosa, celulosa y lignina (Alvarado *et al.*, 2022; Saldarriaga *et al.*, 2015).

Caracterización primaria de la biomasa mediante TGA-DTG

Es primordial conocer la forma en que se correlacionan, de manera directa, masa y tiempo en las señales del DTG, lo cual permite el análisis cinético de la biomasa sujeta a procesos térmicos como la pirólisis que es el primer paso a realizar (Zha *et al.*, 2023). La importancia de llevar a cabo estudios de cinética radica principalmente en el diseño de reactores y a la vez en la optimización bioenergética de la biomasa como materia prima. De esta manera, al efectuar un análisis más a fondo para el cálculo de los parámetros cinéticos (energía de activación, orden de reacción y factor pre-exponencial), se pueden diseñar correctamente las condiciones de operación tan importantes como tiempo de residencia de la biomasa, temperaturas de inicio y final, presión de los gases, velocidades de flujo del medio oxidante y concentraciones de reactivos, haciendo posible escalar a plantas pirolíticas de biomasa donde es posible la obtención de productos de alto valor agregado como pellets,

briquetas, carbón, hidrógeno y metano. Los métodos de cinética en procesos de pirólisis posibilitan lo antes mencionado.

Análisis cinético y termodinámico en TGA

A partir de los datos obtenidos del análisis TGA y su posterior cálculo de la derivada respecto al tiempo o temperatura, es posible determinar el grado de avance o conversión másica de la biomasa. De esta manera se pueden extrapolar los parámetros cinéticos de tal conversión a diferentes temperaturas (fijando la presión parcial del gas), para series isotérmicas, o diferentes velocidades de calentamiento para series no isotérmicas. La expresión de Arrhenius, representa la descomposición térmica de la biomasa en función de la velocidad de reacción y del tiempo en condiciones donde la temperatura es constante. Considerando la velocidad de descomposición (da/dt) en condición no isotérmica, el grado de avance (α) en la degradación térmica, la velocidad de calentamiento (β) y la resolución aproximada a través del método de Doyle (Doyle, 1962), se puede describir el proceso de pirólisis, a partir de la ecuación 1. Sin embargo, es necesario considerar que la diferencia de temperaturas entre la muestra y la de referencia no sea significativa (Ali *et al.*, 2018).

$$G(\alpha) = \int_{T_0}^T \frac{A}{B} \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right] * dT \quad (1)$$

Existen decenas de modelos matemáticos para la determinación de los parámetros cinéticos (Aranzazu *et al.*, 2013). Actualmente existen seis de los modelos de mayor publicación en la actualidad. Cinco de ellos son iso-conversionales y no-iso-termicos y corresponden a los modelos matemáticos de Friedman (Luo *et al.*, 2020), Flynn-Wall-Ozawa (Rahib *et al.*, 2020), Kissinger-Akahira-Sunose (Clemente *et al.*, 2022), Starink (Singh *et al.*, 2020) y finalmente el modelo iso-conversional de Popescu (Yu *et al.*, 2020). Debido a las diferentes curvas y velocidades de calentamiento que se utilizan con el mismo valor de conversión, estos modelos tienen la ventaja de obtener un perfil más exacto de la energía de activación en función del grado de avance en el proceso de pirólisis, por lo tanto, se reducen errores en función del mecanismo de reacción (Khawam, y Flanagan, 2005). El sexto modelo indicado como Kissinger, a diferencia de los anteriores es no-iso-conversional (Vyazovkin, 2020).

Para calcular la energía de activación (E_a) en cada uno de los métodos, se requiere considerar el valor de la pendiente (m) que se forma en el gráfico resultante de cada método. El factor pre-exponencial (A) está directamente relacionado con el valor de la ordenada ó intercepto al origen de acuerdo a cada modelo graficado.

El análisis termodinámico es parte de la optimización del proceso térmico de los residuos de biomasa. Una vez obtenida la energía de activación con cada uno de los seis modelos matemáticos antes mencionados, es posible el cálculo de los parámetros termodinámicos como entalpía (ΔH), energía libre de Gibbs (ΔG) y entropía (ΔS). Es recomendable calcular los parámetros termodinámicos a una baja

velocidad de calentamiento entre 10-15°C/min. Las ecuaciones para calcular cada parámetro termodinámico son bien conocidas (Alvarado *et al.*, 2022).

Conclusión

El análisis termogravimétrico (TGA) y su derivada (DTG) se han empleado en diversos materiales incluyendo la biomasa para el estudio de las principales reacciones y transformaciones primarias en su descomposición en atmósfera inerte o reactiva, de esta manera, uno de los objetivos es el análisis de la descomposición térmica. También es posible estudiar las reacciones que se producen entre la muestra y el gas de purga si implica variación de masa (aumento o disminución). Por lo tanto, es posible clasificar los procesos térmicos que ocurren en un dispositivo TGA según la variación positiva (adsorción, oxidación y reducción) o negativa (desorción, descomposición térmica con formación de volátiles, oxidación ó combustión, vaporización y sublimación) de la masa. De acuerdo con el tratamiento de los datos y a través de la primera derivada, es posible interpretar la composición primaria del material, así como los parámetros cinéticos y termodinámicos de la degradación térmica. En este sentido y una vez optimizado el proceso térmico, como la pirólisis, es posible la captación de productos como metano, hidrógeno, propano que pueden ser almacenados y redirigidos para su uso directo en celdas de combustible como alternativa para la generación de energía eléctrica en zonas de difícil acceso, donde las redes eléctricas no llegan a abastecer de energía a las comunidades rurales.

Referencias

- Ali, I., Naqvi, S. R., & Bahadar, A. (2018). Kinetic analysis of *Botryococcus braunii* pyrolysis using model-free and model fitting methods. *Fuel*, *214*, 369-380.
- Alvarado-Flores, J. J., Alcaraz-Vera J. V, Ávalos-Rodríguez, M.L., Rutiaga-Quiñones, J. G., Valencia-Espino, J., Guevara-Martínez, S. J., & Aguado-Zarraga R. (2022). Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp from Mexico: Potential for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(70), 30107-30127.
- Aranzazu Ríos, L. M., Cárdenas Muñoz, P. V., Cárdenas Giraldo, J. M., Gaviria, G. H., Rojas González, A. F., & Carrero Mantilla, J. I. (2013). Modelos cinéticos de degradación térmica de polímeros: una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *12*(23), 113-129.
- Auroux, A. (Ed.). (2013). *Calorimetry and thermal methods in catalysis*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bensharada, M., Telford, R., Stern, B., & Gaffney, V. (2022). Loss on ignition vs. thermogravimetric analysis: A comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments. *Journal of Paleolimnology*, 1-7.
- Brown, M. E., Bhengu, T. T., & Sanyal, D. K. (1994). Temperature calibration in thermogravimetry using energetic materials. *Thermochimica acta*, *242*, 141-152.

- Clemente-Castro, S., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Giráldez, I., & Díaz, M. J. (2022). Pyrolysis kinetic, thermodynamic and product analysis of different leguminous biomasses by Kissinger-Akahira-Sunose and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *162*, 105457.
- Craig, D. Q., & Reading, M. (Eds.). (2006). *Thermal analysis of pharmaceuticals*. CRC press.
- Doyle, C. D. (1962). Estimating isothermal life from thermogravimetric data. *Journal of Applied Polymer Science*, *6*(24), 639-642.
- Gallagher, P. K., & Brown, M. E. (2003). Handbook of thermal analysis and calorimetry.
- Gallagher, P. K. (1997). *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, (Ed. E.A. Turi), Academic Press, New York, 2nd Edn, Ch.1.
- Khawam, A., & Flanagan, D. R. (2005). Complementary use of model-free and modelistic methods in the analysis of solid-state kinetics. *The Journal of Physical Chemistry B*, *109*(20), 10073-10080.
- Luo, L., Guo, X., Zhang, Z., Chai, M., Rahman, M. M., Zhang, X., & Cai, J. (2020). Insight into pyrolysis kinetics of lignocellulosic biomass: isoconversional kinetic analysis by the modified friedman method. *Energy & Fuels*, *34*(4), 4874-4881.
- Rahib, Y., Sarh, B., Bostyn, S., Bonnamy, S., Boushaki, T., & Chaoufi, J. (2020). Non-isothermal kinetic analysis of the combustion of argan shell biomass. *Materials Today: Proceedings*, *24*, 11-16.
- Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Pablos, A., Amutio, M., Olazar, M., & Bilbao, J. (2015). Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel*, *140*, 744-751.
- Singh, R. K., Patil, T., & Sawarkar, A. N. (2020). Pyrolysis of garlic husk biomass: physico-chemical characterization, thermodynamic and kinetic analyses. *Biore-source Technology Reports*, *12*, 100558.
- Vyazovkin, S., Rives, V., & Schick, C. (2010). Making impact in thermal sciences: overview of highly cited papers published in *Thermochimica Acta*. *Thermochimica Acta*, *500*(1-2), 1-5.
- Vyazovkin, S. (2020). Kissinger method in kinetics of materials: Things to beware and be aware of. *Molecules*, *25*(12), 2813.
- Yu, D., Hu, S., Wang, L., Chen, Q., & Dong, N. (2020). Comparative study on pyrolysis characteristics and kinetics of oleaginous yeast and algae. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(19), 10979-10990.
- Zha, Z., Wu, K., Ge, Z., Ma, Y., Zeng, M., Wu, Y., Tao, Y & Zhang, H. (2023). Effect of oxygen on thermal behaviors and kinetic characteristics of biomass during slow and flash pyrolysis processes. *Combustion and Flame*, *247*, 112481.

CAPÍTULO 9

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA: PODER CALORÍFICO, COMPUESTOS POLIMÉRICOS

SERAFÍN COLIN-URIETA¹
ARTEMIO CARRILLO-PARRA²

¹ Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, México, C. P. 61614.

Email: scuserafin@gmail.com

² Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Blvd. del Guadiana # 501 Ciudad Universitaria, 34160 Durango, México.

Email: acarrilloparra@ujed.mx

Resumen

Los polímeros son macromoléculas orgánicas de alta masa molecular, presentes naturalmente como la celulosa, el almidón y las proteínas, o creados sintéticamente, como el polietileno y poliestireno. Los polímeros naturales compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, forman parte de la biomasa lignocelulósica de la madera, cultivos, residuos agrícolas y forestales. El poder calorífico, parámetro importante de los biocombustibles, se relaciona con la cantidad de enlaces carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno, su determinación se basa en normas y métodos ASTM, ISO y UNE, el valor varía entre 14 y 23 MJ/kg dependiendo de su composición, lo que le permite su aprovechamiento como recurso energético. Se han desarrollado modelos predictivos del poder calorífico: algunos basados en las proporciones ligno-holocelulósicas y extraíbles, otros en el contenido de carbono fijo, materia volátil, cenizas y humedad y un tercer grupo que considera el contenido de elementos (C, H, N, S, Cl, O y cenizas).

Palabras clave: biomasa, material volátil, carbono, celulosa, hemicelulosa, lignina, normas.

Introducción (compuestos poliméricos)

Los polímeros son una diversa gama de materiales extremadamente heterogéneos que se forman por la unión de unidades más pequeñas llamadas monómeros. Tienen múltiples usos en la industria, desde suplementos en la alimentación animal hasta la producción de combustibles. También se emplean en la prevención de enfermedades y como refuerzos en polímeros termoplásticos (Sánchez et al., 2022). Su bajo costo, amplia variedad de propiedades y versatilidad han impulsado su uso a nivel mundial. En 2018, la producción global superó los 359 millones de toneladas, (Posada & Flores, 2022). Por lo anterior, el objeti-

vo principal de esta investigación es determinar y comparar el poder calorífico de compuestos poliméricos y su potencial como una fuente de energía renovable.

El poder calorífico y su relación con otros parámetros en los compuestos poliméricos de origen natural

El poder calorífico se refiere al calor liberado cuando una masa se oxida completamente a una temperatura y presión específicas, expresado en unidades de energía por cantidad (MJ/kg o MJ/m³). La cantidad de energía desprendida puede variar de acuerdo a la tecnología de conversión y el tipo de combustible (McKendry, 2002). El poder calorífico puede variar dependiendo de la composición (polímeros sintéticos o naturales) (Tabla 1).

TABLA 1. VALORES DEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR DE DIFERENTES MATERIALES POLIMÉRICOS (IOELOVICH, 2018).

Materiales Poliméricos	Poder calorífico Superior (MJ/kg)	Poder calorífico Inferior (MJ/kg)
Caucho sintético (elastómero)	45.0	42.4
Polietileno (PE)	47.1	44.6
Poliestireno (PS)	41.7	40.0
Maderas blandas	20.2	19.1
Bagazo	19.3	18.2
Rastrojo de maíz	17.7	17.5

La celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos forman la mayor parte de la biomasa. Esta biomasa es una fuente renovable de energía y su procesamiento térmico efectivo requiere de un conocimiento detallado de su contenido de humedad, poder calorífico, carbono fijo, material volátil, cenizas y la proporción lignocelulósica, ya que cada uno impacta en el poder calorífico disponible. El poder calorífico varía según el tipo de biomasa, clima y suelo donde se cultiva. La diferencia en la composición química y la proporción de estos compuestos en las diferentes biomásas generan variaciones en el poder calorífico (18.6 MJ/kg en celulosa+holocelulosa y 23.3-25.6 MJ/kg en lignina) (Maksimuk et al., 2021). Las biomásas lignocelulósicas (biopolímeros) son compuestas en primer orden por los elementos de carbón (37-56%), hidrógeno (5-7%) y oxígeno (32-46%) (Huang & Lo, 2020) mientras que los contenidos de azufre y nitrógeno son bajos. Las biomásas tienen un alto contenido de oxígeno con respecto a los hidrocarburos lo que no contribuye al poder calorífico.

Métodos para la caracterización de los biopolímeros

La caracterización de los biopolímeros es fundamental para determinar su eficiencia energética. Esta se realiza mediante análisis como el poder calorífico, el análisis proximal (contenido de humedad, cenizas, material volátil, carbono fijo) y el análisis elemental (carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno). Estos valores son esenciales para determinar su eficiencia energética. La descripción detallada de las propiedades se lleva a cabo siguiendo normas como ASTM, ISO, UNE y otros métodos estandarizados.

Modelos predictivos del poder calorífico

Estos modelos se fundamentan en análisis químicos de los materiales lignocelulósicos (biopolímeros) y se dividen en tres grupos. El primero se basa en el análisis estructural que determina las proporciones de holocelulosa (celulosa más hemicelulosa), lignina y extraíbles de la biomasa. El segundo grupo comprende modelos basados en análisis proximales, considerando el contenido de carbono fijo, material volátil, cenizas y humedad. Finalmente, el tercer grupo consiste en modelos basados en análisis elementales que incluyen carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro, oxígeno y el contenido de cenizas en el biocombustible.

Conclusiones

La biomasa es un recurso energético clave en el ámbito de las energías renovables. Compuesta principalmente por tres polímeros orgánicos esenciales: celulosa, hemicelulosa y lignina, se trata de un producto polimérico donde estos componentes estructurales se entrelazan de manera compleja, otorgándoles su versatilidad y utilidad en diversas industrias. Dado que se regenera constantemente, puede considerarse como un compuesto polimérico fundamental para la producción de energía y otros materiales. El poder calorífico contenido en la biomasa varía según el tipo y las condiciones de crecimiento, lo que influye en su calidad como biocombustible. Su estructura compleja requiere un enfoque multidisciplinario para su estudio y aprovechamiento óptimo.

Referencias

- Huang, y. F., & Lo, S. L. (2020). Predicting heating value of lignocellulosic biomass based on elemental analysis. *Energy*, 191, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116501>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- Maksimuk, Y., Antonava, Z., Krouk, V., Korsakova, A., & Kursevich, V. (2021). Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for

- biomass. Fuel, 299, 120860. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120860>.
- Posada, J. C., & Florez, E. M. (2022). Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales. *Informador técnico*, 86(1), 94-110. <https://doi.org/10.23850/22565035.3417>.
- Sánchez, C. C. Z., Castro, G. B. L., & Anchundia, B. J. C. (2022). Materiales Poliméricos y el impacto ambiental: Una revisión. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(6), 596-614. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i6.4092>

CAPÍTULO 10

MONITOREO DE EMISIONES POR EL USO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

VÍCTOR MANUEL RUIZ GARCÍA

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia C.P. 58190, México.
E-mail: vruiuz@cieco.unam.mx

Resumen

Actualmente, los biocombustibles son poco utilizados a nivel nacional, y la leña es el biocombustible de mayor uso. Los biocombustibles son una alternativa para reducir contaminantes emitidos en los diferentes sectores productivos del país. El monitoreo de contaminantes permitirá regular las emisiones con impacto a la salud y al ambiente, lo que garantizará el bienestar de la población, evitando muertes prematuras por la inhalación de humo y contribuyendo a conservar los ecosistemas. En México, se tienen capacidades y experiencia para evaluar y monitorear el uso de biocombustibles sólidos y ecotecnologías energéticas. La evaluación y monitoreo de emisiones permitirá detonar de una manera regulada los mercados locales y regionales que utilizan biocombustibles sólidos.

Palabras clave: ecotecnologías, contaminantes gaseosos, monitoreo, sectores económicos, bioenergéticos.

Los biocombustibles sólidos en los sectores productivos del país

El uso de los biocombustibles sólidos es una necesidad cotidiana en los diferentes sectores económicos de México, principalmente los sectores residencial, comercial e industrial. Como la leña, que es un biocombustible común para cocinar, calentar la vivienda y agua, e incluso ahumar alimentos en el sector residencial (Ruiz-García et al., 2021). El carbón vegetal es otro biocombustible sólido utilizado en los hogares en México. En el sector comercial, existen actividades de asado con carbón, horneado de pan y cocción de tortillas con leña, solo por mencionar algunos. Para el sector industrial, sobre todo de pequeña escala, se destilan bebidas alcohólicas en alambiques que utilizan leña, hornos de carbón vegetal en la alfarería, hornos para cocción de ladrillo que utilizan astillas y residuos de la industria maderera, e incluso los hornos de producción de carbón vegetal que utilizan leña. Por otro lado, existen biocombustibles sólidos emergentes como los pellets y briquetas, estos biocombustibles son elaborados con residuos – como el aserrín, el rastrojo, y las cascaras y huesos de frutos -los residuos son prensados para generar

pequeños cilindros que se combustonan para generar calor (Musule et al., 2021), o electricidad (Tauro et al, 2018) (ver Figura 1).

El uso de biocombustibles sólidos soluciona necesidades básicas de la población. Sin embargo, existe una relación entre el uso de biocombustibles sólidos con la tecnología en la que se utiliza, esta relación puede generar abundantes o nulas cantidades de contaminantes (Serrano-Medrano et al., 2018).



Figura 1. Tipos de biocombustibles sólidos, a la derecha pellets de aserrín de pino, al centro leña de encino blanco, y a la izquierda rastrojo de podas agrícolas

Monitoreo de emisiones

Para evaluar las emisiones, existen diversos equipos de medición, algunos equipos se instalan en campo mientras que otros son de uso exclusivo para laboratorio. Por un lado, para mediciones en campo, existen analizadores de flujo de gases portátiles, estos equipos son pequeños y cuentan con sensores integrados para la medición de contaminantes gaseosos, los sensores se calibran para asegurar lecturas correctas, y al final de su vida útil, se reemplazan por unos nuevos. Los equipos cuentan con sondas metálicas que se colocan directamente en contacto con los gases de combustión. Por otro lado, existen equipos muy robustos y complejos, que están instalados en laboratorio, y se encuentran conectados a corrientes de voltaje especiales, a líneas de gases que permiten operarlos, y en cuartos bajo condiciones de temperatura y humedad controladas (Figura 2). Un ejemplo, son los cromatógrafos de gases, que poseen una columna con una longitud de 30 m, la columna es una especie de manguera con un diámetro muy pequeño por donde pasan los gases, y cuyo objetivo es que los gases tengan interacción con las paredes internas de la columna para retrasar el recorrido de los gases de moléculas más grandes, y permitir que los contaminantes de moléculas pequeñas salgan primero. Cada molécula saldrá a diferente tiempo, esos tiempos son conocidos como tiempo de residencia, y son muy importantes para identificar a los contaminantes (Quiñones-Reveles et al., 2021; Ruiz-García et al., 2022).



Figura 2. Equipos para medición de emisiones. A la derecha un cromatógrafo de gases y a la izquierda un conjunto de analizadores de flujo de gases

El hollín capturado tiene diversos diámetros/tamaños, usualmente los diámetros de 2.5 y 10 micras son los más analizados, conocidos como material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Por medio de un ciclón y variaciones en el flujo de muestreo, es posible seleccionar el tamaño de partícula. La captura de material particulado en filtros es conocida como método gravimétrico, y consiste en tomar muestras pequeñas de contaminantes que provienen de chimeneas de estufas de leña, hornos, y calderas, solo por mencionar algunos dispositivos, para después hacer pasar la muestra de emisiones por un ciclón a una velocidad deseada y manipulable que nos permite tener el diámetro de partícula buscado. Finalmente, esas partículas se impactan en filtros que se pesan para conocer el material particulado recolectado. Los filtros que se utilizan para capturar el hollín son de diversos tamaños y materiales (ver Figura 3). El monitoreo de contaminantes gaseosos, permite conocer los impactos que tienen en la población por fuentes de contaminantes cercanas y/o por el reemplazo de nuevas tecnologías. Estudios realizados en temas de salud, muestran que el uso adecuado de biocombustibles cumple con la calidad del aire respecto a concentraciones CO y $PM_{2.5}$, lo que representa que los usuarios tienen mayores probabilidades de no tener enfermedades respiratorias y contar con años de vida saludable (Ruiz-García et al., 2018).



Figura 3. Manejo de filtros utilizados en la captura de material particulado

Los equipos de monitoreo, ya sean portátiles o de uso exclusivo de laboratorio, deben tener mantenimientos menores anuales, y mayores en función de sus años de vida útil. Lamentablemente, existe una dependencia por los fabricantes extranjeros de equipo, lo que provoca que la adquisición, las capacitaciones y los mantenimientos de equipos de medición de gases, sean costosas. Usualmente, las universidades, dependencias de gobierno y algunas instituciones privadas cuenta con equipos e infraestructura para realizar este tipo de análisis. En México, se encuentra el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, con capacidades e infraestructura únicas para realizar mediciones de biocombustibles y ecotecnologías energéticas.

Retos y oportunidades del monitoreo de contaminantes

El monitoreo de contaminantes gaseosos, permite contribuir en la generación de reglamentos, leyes y normativas para plasmar los límites máximos y mínimos permisibles de contaminación, no solo en términos ambientales, sino también de salud (Schilman et al., 2021). Actualmente, en México la información existente se enfoca al uso de combustibles fósiles, y detalla las emisiones en fuetes fijas y móviles, la manera de medirlo y hasta existen regulaciones en el tema, para el caso de los biocombustibles, es muy pobre la información con la que se cuenta. Recientemente, se actualizó la ley y el reglamento de los bioenergéticos, lo que impulsará el desarrollo de normativa y estándares en el tema de emisiones por el uso de biocombustibles sólidos. Por ahora solo se cuenta con una normativa sobre evaluaciones de estufas de leña (NMX-Q-001-2018-NORMEX), ahí se detalla la forma de medir emisiones, los valores máximos permitidos, los equipos pertinentes para la medición y recolección de gases (Economía, 2018). En esta normativa se presenta la manera adecuada de medir emisiones para estufas que utilizan plancha y chimenea, plasmados también en protocolos internacionales (ISO, 2018).

Respecto al costo de los equipos, las instituciones enfocadas en el monitoreo de contaminantes gaseosos, se encuentran en la constante búsqueda de desarrollar tecnología nacional de bajo costo, para poder implementar campañas de medición constantes y poder documentar los impactos ambientales y a la salud en los diversos sectores, los cuales que han sido evaluados en muy pocas ocasiones (Figura 4).

Existen algunos estudios realizados sobre emisiones de biocombustibles, algunos enfocados a gases de efecto invernadero y otros a la calidad del aire intramuros. Las conclusiones de estos estudios recomiendan el uso de ecotecnologías y biocombustibles de calidad. El usar biocombustibles sólidos secos (humedades inferiores al 10%), permite que la reacción de combustión mejore, disminuyendo la producción de contaminantes. Por otro lado, el uso de aislantes en las cámaras de combustión de las tecnologías ayuda a conservar una mayor cantidad de calor y beneficia a la combustión. Ecotecnologías con chimenea usadas en el sector residencial para realizar tareas de cocinado, son capaces de ventilar entre 95-99% de las emisiones al exterior del cuarto de cocinado (Figura 5).



Figura 4. Emisiones en los diversos sectores, a la izquierda horno para producción de carbón vegetal, al centro horno para cocción de ladrillo, y a la izquierda un fuego abierto para cocinar.

Existe la necesidad de contar con más estudios de este tipo, lo que permitirá identificar más tipos de biocombustibles, sus calidades, identificar si son adecuados para fines energéticos o deberían tener otro uso, todo esto permitirá reducir los impactos a nuestro planeta y a la población. Incluso, estos estudios permitirán evidenciar que el uso adecuado de los biocombustibles sólidos ayuda a mitigar gases de efecto invernadero, permite tener calidad del aire al interior de las viviendas, impulsa la producción local de energéticos al mismo tiempo que se revaloran los tipos de biomasa que anteriormente eran consideradas residuos y se quemaban al aire libre para liberar los espacios donde se vertían. De esta manera se logrará un acceso a energías limpias y de una manera más equitativa entre la población energéticamente más vulnerable.



Figura 5. Cocina rural con buena calidad del aire mientras se utiliza una estufa de leña (cortesía del Clúster de Biocombustibles Sólidos).

Referencias

- Economía, S. de. 2018. NMX-Q-001-NORMEX-2018. Estufas que funcionan con leña-evaluación de funcionalidad, seguridad, durabilidad, eficiencia térmica y nivel de emisiones-especificaciones, métodos de prueba y requisitos mínimos. *Diario Oficial de la Federación*. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5551618&fecha=01/03/2019.
- ISO. 2018. *TECHNICAL REPORT ISO / TR solutions — Harmonized laboratory cookstoves based on laboratory testing*, vol. 2018.
- Musule, R., Núñez, J., Bonales-Revuelta, J., García-Bustamante, C. A., Vázquez-Tinoco, J. C., et al. 2021. Cradle to Grave Life Cycle Assessment of Mexican Forest Pellets for Residential Heating. *BioEnergy Research*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10337-6>.
- Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., et al. 2021. Assessment of pellets from three forest species: From raw material to end use. *Forests*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/f12040447>.
- Ruiz-García, V. M., Edwards, R. D., Ghasemian, M., Berrueta, V. M., Princevac, M., et al. 2018. Fugitive Emissions and Health Implications of Plancha-Type Stoves. *Environmental Science and Technology*, 52(18): 10848–10855.
- Ruiz-García, V., Medina, P., Vázquez, J., Villanueva, D., Ramos, S., et al. 2021. Bioenergy Devices : Energy and Emissions Performance for the Residential and Industrial Sectors in Mexico. *BioEnergy Research*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>.
- Ruiz-García, V. M., Huerta-Mendez, M. Y., Vázquez-Tinoco, J. C., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., et al. 2022. Pellets from Lignocellulosic Material Obtained from Pruning Guava Trees: Characterization, Energy Performance and Emissions. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031336>.
- Schilman, A., Ruiz-García, V., Serrano-Medrano, M., De La Sierra De La Vega, L. A., Olaya-García, B., et al. 2021. Just and fair household energy transition in rural Latin American households: Are we moving forward? *Environmental Research Letters*, 16(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac28b2>.
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., et al. 2018. Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad5b8>.
- Tauro, R., Serrano-Medrano, M., & Masera, O. 2018. Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7): 1527–1539.

CAPÍTULO 11

APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

MARIO MORALES MÁXIMO

Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, México, C. P. 61614.
E-mail: mario.morales@uiim.edu.mx

Resumen

Las aplicaciones de la Termografía en el análisis de los Biocombustibles Sólidos (BCS), técnica basada en la detección de radiación infrarroja, se presenta como una herramienta valiosa en el análisis (BCS) derivados de la biomasa lignocelulósica, este método ofrece información detallada sobre la temperatura y variaciones térmicas en las etapas de producción, almacenamiento y combustión de los BCS, aunque la termografía es esencial para evaluar la calidad, eficiencia y seguridad de estos combustibles renovables, se destaca la importancia de combinarla con otras técnicas de análisis para obtener una comprensión completa de sus propiedades.

Palabras Clave: Termografía, Biomasa, Biocombustibles sólidos.

Introducción a la termografía: principios y aplicaciones

La termografía es una técnica utilizada para detectar y medir la radiación infrarroja (IR) emitida por objetos debido a su temperatura. Esta técnica se basa en el principio de que todos los objetos con una temperatura por encima del cero absoluto (-273.15°C o 0 Kelvin) emiten radiación térmica en forma de luz infrarroja (de Prada Pérez de Azpeitia, 2016).

La termografía, basada en la detección de radiación infrarroja emitida por objetos según su temperatura, utiliza cámaras termográficas para convertir esta radiación en imágenes visibles; estas imágenes, presentadas en colores que indican variaciones de temperatura, son fundamentales para el análisis de biocombustibles sólidos Véase Figura 1. La aplicación de la termografía en esta área se centra en la generación de imágenes térmicas para evaluar la calidad, eficiencia y comportamiento de los BCS, especialmente durante la combustión (Balageas, 2007) Kelvin etc. no son de mucha precisión. Afortunadamente generalmente en Evaluación No Destructiva (END).

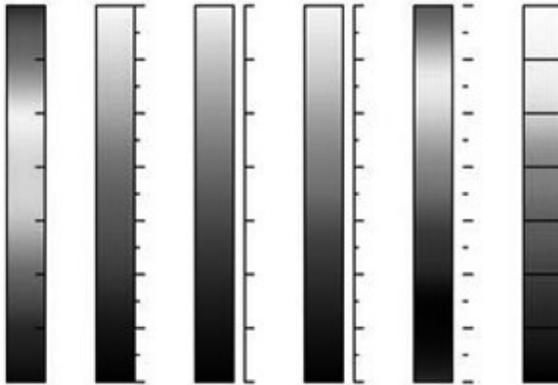


Figura 1. Imagen de colores emitida en la medición a través de una cámara termográfica.

En sí, la termografía proporciona imágenes térmicas que permiten estudiar la distribución de temperatura durante la combustión y otros procesos térmicos, su aplicación resulta valiosa para mejorar la eficiencia, calidad y seguridad de estos combustibles, se destaca su utilidad para evaluar la uniformidad de la distribución de temperatura, identificar impurezas y optimizar los procesos de combustión, contribuyendo así al desarrollo sostenible de fuentes de energía renovable.

Características y Aplicaciones de la Termografía en Biocombustibles Sólidos

La termografía destaca como una herramienta esencial en la caracterización de BCS derivados de la biomasa lignocelulósica, su capacidad para detectar puntos calientes y fríos en la superficie de estos combustibles permite identificar problemas de calidad, como distribución desigual de humedad o presencia de impurezas. Además, la termografía es crucial en el control de temperatura durante procesos de secado y producción, contribuyendo a mantener rangos óptimos y mejorar la calidad del biocombustible resultante (Gomez-Heras et al., 2013). La aplicación de la termografía se extiende a la detección de irregularidades durante la fabricación de BCS, identificando zonas con problemas de densidad, humedad o contenido energético desigual. En el ámbito de la combustión, la termografía se revela como una herramienta efectiva para monitorear y prevenir problemas durante el almacenamiento a largo plazo, así como para estudiar procesos de descomposición térmica (Morales-Máximo, López-Sosa, & Rutiaga-Quiñones, 2018).

Operación y procesamiento de imágenes termográficas

La calidad de las imágenes termográficas depende de una cuidadosa configuración de las cámaras, selección adecuada de la cámara termográfica y calibración previa, el procesamiento y análisis de las imágenes se realizan con software especializado para identificar patrones de distribución de temperatura y zonas anómalas, la interpretación de resultados es crucial, ya que anomalías pueden indicar problemas en la calidad del biocombustible, eficiencia de combustión o distribución del calor.

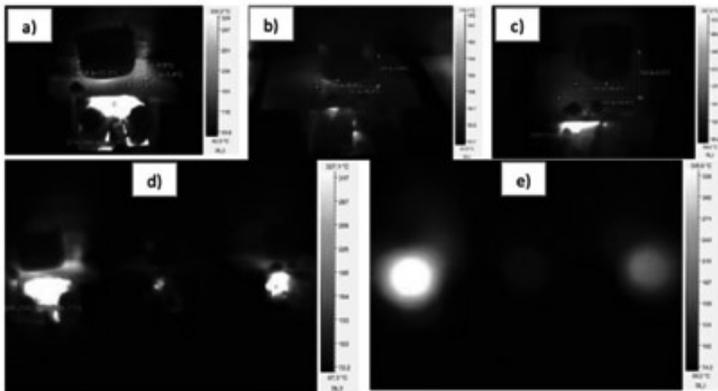


Figura 2. Distribución y medición de la termografía en diferentes tiempos con su respectiva emisión de energía: a) Punto de análisis 1, b) Punto de análisis 2, c) Punto de análisis 3, d) Punto de análisis 4, e) Punto de análisis 5.

Como se muestra en la Figura 2, la comparación y seguimiento del análisis se puede realizar a través de la comparación de las imágenes termográficas tomadas en diferentes momentos o condiciones para evaluar cambios en la distribución de temperatura, esto puede proporcionar información sobre la evolución de la combustión, la formación de cenizas y otros procesos térmicos relacionados.

Por último, el estudio de la combustión y eficiencia energética puede ser utilizada en los biocombustibles sólidos en procesos de combustión, la termografía puede utilizarse para analizar la distribución de temperaturas en el lecho de combustión, esto puede ayudar a optimizar la eficiencia energética y reducir las emisiones nocivas al ajustar la distribución del flujo de aire y combustible. En sí, la termografía puede proporcionar información en tiempo real sobre la distribución de temperaturas en la zona de combustión, que se le puede denominar “puntos calientes”, en este sentido este análisis puede determinar la combustión de las briquetas, pellets, leña o alguna otra biomasa, esta herramienta ayuda a como se menciona con anterioridad en el desprendimiento térmico alcanzado por los combustibles en distintos tiempos, lo cual visualiza de manera térmica el rendimiento energético, lo cual la termografía puede utilizarse para evaluar la eficiencia energética de sistemas de combustión donde se apliquen los biocombustibles sólidos, ayudando a identificar áreas donde podría estar ocurriendo una pérdida de calor no deseada, como se ha hecho y reportados en trabajos anteriores (Mario Morales-Máximo, 2019).

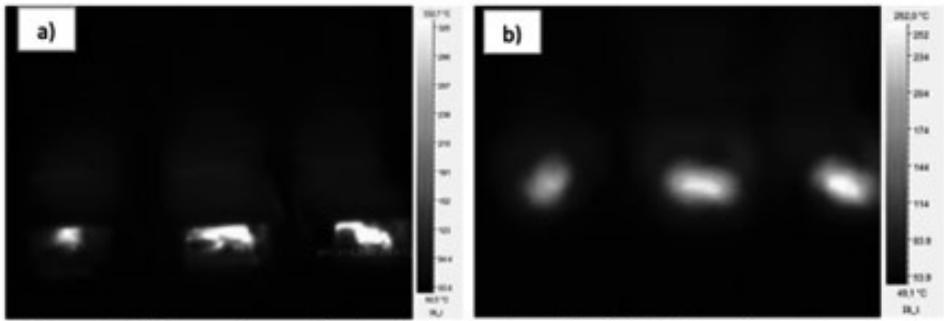


Figura 3. Análisis de la combustión con diferentes enfoques de la cámara termográfica: a) Difuminación mínima, b) Difuminación máxima

Conclusiones y perspectivas futuras

En conclusión, la termografía emerge como una técnica valiosa para el análisis integral de biocombustibles sólidos, ofreciendo información detallada sobre su temperatura y distribución térmica; sin embargo, se enfatiza la necesidad de experiencia y conocimientos especializados para interpretar correctamente las imágenes, se destaca la importancia de establecer protocolos consistentes de medición y análisis para obtener resultados confiables y significativos. La termografía no solo mejora la eficiencia y calidad de los biocombustibles sólidos actuales, sino que también se posiciona como una herramienta esencial en la investigación y desarrollo de nuevos tipos de combustibles derivados de la biomasa lignocelulósica.

Referencias

- Balageas, D. L. (2007). Termografía Infrarroja : una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). *IV Conferencia Panamericana de END*, 14. <https://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/128.pdf>
- de Prada Pérez de Azpeitia, F. I. (2016). La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias.*, 1(3), 617–627. https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i3.08
- Gomez-Heras, M., García Morales, S., & Fort, R. (2013). Integración de datos de termografía de infrarrojos y otras técnicas no destructivas en detección de humedades y sales. *3er Congreso Iberoamericano y XI Jornada de Técnicas de Restauración y Conservación Del Patrimonio*, 1, 1–9. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/5a5e81b5-a38c-4f08-9f33-20f2fa-3483db/content>
- Morales-Máximo, M, Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Pintor-Ibarra, L. ., & Rutiaga-Quñones, J. . (2018). Materiales densificados con biomasa forestal como alternativa energética en la comunidad de san francisco Pichátaro,

Michoacán, México. *Red Mexicana de Bioenergía*, XIV, 168–169. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Morales-Máximo, Mario. (2019). Aprovechamiento del aserrín y viruta de pino (*Pinus spp*) para la producción y evaluación de briquetas, como energía alterna en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. In *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58151>

CAPÍTULO 12

SUSTENTABILIDAD DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

CARLOS A. GARCÍA

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia 58190, Michoacán, México.

E-mail: cgarcia@enesmorelia.unam.mx

Resumen

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en el mundo. Existen biocombustibles sólidos (BCS) como la leña y el carbón, que se emplean ampliamente para cocción en zonas rurales y urbanas, no obstante, existen otros BCS llamados modernos, como los pellets y las briquetas. Todos los BCS cuentan con impactos a la sustentabilidad, tanto en términos positivos como negativos. Los principales impactos a la sustentabilidad de los BCS están en las emisiones contaminantes del aire y sus respectivos daños a la salud, la potencial deforestación y degradación de bosques si estos no se producen con cuidado, la posible contribución al cambio climático si no se emplean tecnologías adecuadas, así como afectaciones a la biodiversidad. En términos positivos, los BCS pueden contribuir al desarrollo rural y a la creación de empleos, a la sustitución de combustibles fósiles en la industria de manera costo efectiva, a la vez mitigar emisiones de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: sustentabilidad, bioenergía, biocombustibles.

Introducción

La energía obtenida de la biomasa es la principal fuente de energía renovable a nivel global con alrededor del 10% del consumo de energía (IRENA, 2022). La mayor parte de esta energía proviene de los llamados biocombustibles sólidos (BCS), principalmente de la leña que se emplea en los hogares para cocción, sobre todo en zonas rurales y periurbanas. El uso de BCS en aplicaciones modernas contribuye con el 41% del consumo de BCS.

Los BCS son variados en cuanto a su origen, transformación y sus usos finales. En general podemos encontrar a la leña y el carbón vegetal; los residuos del bosque y de la industria forestal; los pellets y las briquetas y; los residuos agrícolas y agroindustriales.

El uso de BCS, requiere entender los impactos a la sustentabilidad¹ de estos combustibles, de manera que se puedan aprovechar de forma duradera en el largo plazo y potencializar sus beneficios ambientales y socioeconómicos, a la vez de reducir sus impactos negativos.

Los impactos a la sustentabilidad de los BCS son variados, tanto en sentido positivo, es decir, que promueven mejoras en las dimensiones social, ambiental y económica, como impactos negativos en estas mismas dimensiones. En términos de los impactos positivos, en general los BCS representan ventajas comparativas con respecto a otras fuentes de energía renovable, por ejemplo, generan una mayor creación de empleos y de desarrollo rural, a la vez que permiten mejorar la seguridad energética, y a que cuentan con el potencial de mitigar emisiones de gases de efecto invernadero (Manzini et al., 2021; WBGU, 2009).

Impactos a la sustentabilidad de los biocombustibles sólidos (BCS)

A continuación, se presenta una revisión general de los impactos a la sustentabilidad de los BCS, iniciando con los combustibles empleados en hogares rurales, para continuar con los combustibles llamados modernos.

Leña y carbón vegetal

La leña es el BCS más empleado a nivel global y en México. Se estima que en el mundo alrededor de 2.8 miles de millones de personas dependen en gran medida de este combustible para satisfacer sus necesidades de cocción, calentamiento de agua y calefacción. El uso de la leña se da principalmente en dispositivos ineficientes, lo que provoca una extracción innecesaria de recursos forestales y que repercute de forma negativa en los bosques (Ahmed et al., 2022). Los dispositivos empleados tradicionalmente tienen también desventajas en términos de daños a la salud, esto debido a que los gases y material particulado producto de la combustión están en contacto con los usuarios (generalmente mujeres y niños en zonas rurales y periurbanas) en espacios cerrados, por lo que son inhalados.

Para paliar los efectos por el uso ineficiente de la leña, se ha propuesto el cambio a tecnologías más limpias y eficientes. Estas tecnologías son variadas y tienen distintos grados de emisiones, no obstante, se han documentado ventajas por su implementación no solo en el ámbito de la salud, sino también en el ahorro de recursos monetarios, usualmente escasos en los contextos rurales.

Por su parte, el carbón vegetal se percibe como un problema ambiental, principalmente en términos de deforestación y degradación de los bosques (debido a

1 En este capítulo se emplea la definición de sustentabilidad como la establece Vallesi et al. (2012) “una producción y utilización de biomasa sin dañar la naturaleza y manteniendo la capacidad de la naturaleza para producir biomasa de forma permanente en el futuro.” Se consideran además las dimensiones ambiental, social y económica de la sustentabilidad.

que el carbón vegetal se produce a partir de la madera de los bosques naturales). La producción de carbón vegetal presenta impactos negativos como altas emisiones de material particulado durante su producción, así como afectaciones al suelo. Por su parte, los impactos positivos reportados fueron bajas emisiones de gases de efecto invernadero comparado con combustibles fósiles, poco uso de agua para su producción, retornos energéticos positivos (se requiere mucho menor cantidad de energía para producirlo que la energía que esta entrega) y alta creación de empleo, si bien, con poca remuneración.

Residuos (del bosque y agroindustriales)

El aprovechamiento energético de los residuos de los bosques y de la industria forestal permite evitar algunos de los impactos generados por estas formas de biomasa. Por ejemplo, los residuos de los bosques pueden contribuir a los incendios forestales, en tanto que los residuos de la industria forestal, al disponerse en vertederos, pueden descomponerse y liberar dióxido de carbono y metano. Al igual que ocurre con otros residuos orgánicos, su acumulación puede provocar lixiviación (Beaumont-Roveda, 1994).

Por su parte el uso de biomasa de origen agrícola y agroindustrial permitiría mitigar algunos impactos ambientales, por ejemplo, la paja de caña de azúcar se suele dejar en el campo para su posterior quema, lo que genera, entre otras cosas, emisiones de material particulado y carbono negro (que tiene un potencial alto de calentamiento global); las cascaras de naranja y los residuos de la palma de aceite se tiran a cielo abierto, lo que provoca que se descompongas y emitan metano; además esta biomasa residual puede producir lixiviados que afectan la calidad del agua. El aprovechamiento de los residuos señalados permitiría eliminar o mitigar estos impactos.

El uso de residuos agrícolas puede permitir además beneficios económicos en su aplicación en la industria, por ejemplo, se pueden sustituir con ahorros combustibles fósiles con el uso de bagazo de caña en los ingenios azucareros. De igual forma, los BCS pueden mitigar emisiones de gases de efecto invernadero comparados con los combustibles fósiles en aplicaciones residenciales e industriales y permiten la creación de empleos e ingresos en zonas rurales. En este sentido, se ha documentado que la cogeneración en ingenios azucareros puede producir 20 veces más empleo que la generación eléctrica con combustibles fósiles (Manzini et al, 2021).

Pellets y briquetas

Existe un gran debate sobre los impactos ambientales reales en los bosques y sobre el clima del aprovechamiento de biomasa procedente de bosque o la industria forestal, ya sea en su uso directo como astillas, o bien de biomasa procesada, como la producción de pellets o briquetas. Se ha argumentado que la producción de pellets afecta a los bosques al emplear los troncos de los árboles, lo que además traería consigo un aumento de las emisiones de carbono a la atmósfera, con el consecuente

cambio climático (Searchinger, 2018). Otros autores señalan que los pellets se producen de los residuos de los aserraderos o de los residuos de la explotación forestal (puntas y ramas principalmente) y no de los troncos, de manera que no hay afectaciones por deforestación a la vez de que el carbono liberado no representa emisiones netas de CO₂, ya que este carbono es capturado conforme los árboles vuelven a crecer. La afectación de los hosques puede a su vez tener impactos negativos en la biodiversidad. En cualquier caso, el manejo sustentable de los bosques puede permitir que sólo se use la biomasa que se crece año con año sin afectar los almacenes de carbono, a la vez de implementar sistemas que aseguren que se usen sólo aquellas biomásas que no tiene usos comerciales más relevantes en términos de ingreso.

Por otra parte, durante la combustión de los pellets y las briquetas se generan emisiones al aire, principalmente de material particulado, en tanto que sus beneficios en la mitigación de gases de efecto invernadero dependen de su forma de producción y el origen de la biomasa. Estos BCS también pueden crear empleos e ingresos en zonas rurales al permitir la conformación de pequeñas empresas que busquen generar cadenas de producción y aprovechamiento de estos combustibles.

Conclusión

Los BCS representan la fuente de energía renovable más usada en el mundo. Los retos y oportunidades relacionados a la sustentabilidad de los BCS son variados y en buena medida dependen del origen de la biomasa, su transformación y sus usos finales. Los BCS presentan ventajas para generar empleo, diversificar fuentes de ingreso y mejorar las condiciones de vida a nivel rural. De igual forma, los BCS pueden mitigar emisiones de gases de efecto invernadero tanto a nivel residencial como a nivel industrial y para la generación eléctrica. Algunas aplicaciones industriales de los BCS permitirían sustituir combustibles fósiles para generación de calor y cogeneración de manera costo efectiva. Entre los retos de los BCS se encuentran la deforestación y degradación de los bosques, emisiones más altas de material particulado y gases contaminantes comparados con los combustibles fósiles. Existen medidas que pueden contribuir a una aplicación más sustentable de los BCS, donde podemos encontrar a el uso de residuos en lugar de biomasa proveniente de plantaciones energéticas; empleo de tecnologías eficientes; certificación en el manejo sustentable de bosques y; la puesta en marcha de tecnologías y optimización de procesos para reducir las emisiones por la combustión.

Referencias

- Ahmed, I. *et al.* (2022). *Environ. Res. Commun.* 4 085003 DOI 10.1088/2515-7620/ac8ae8
- Beaumont-Roveda, E. (1994). Impacto ambiental. In Caso de Estudio: Autoproducción de Electricidad a partir de residuos de Madera y Leña en la República Argentina. FAO. <http://www.fao.org/3/v6204s/v6204s06.htm>
- IRENA (2022) Bioenergy for the energy transition: ensuring sustainability and

- overcoming barriers. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2022/Aug/Bioenergy-for-the-Transition>
- Manzini Poli, Fabio L., Jorge M. Islas-Samperio, Carlos A. García Bustamante, Julio C. Sacramento Rivero, Genice K. Grande-Acosta, Rosa M. Gallardo-Álvarez, Ricardo Musule Lagunes, Freddy Navarro Pineda, and Christian Alvarez Escobedo. 2022. "Sustainability Assessment of Solid Biofuels from Agro-Industrial Residues Case of Sugarcane Bagasse in a Mexican Sugar Mill" *Sustainability* 14, no. 3: 1711. <https://doi.org/10.3390/su14031711>
- Searchinger, T.D., Beringer, T., Holtsmark, B. et al. Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nat Commun* 9, 3741 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06175-4>
- Vallesi, M., D'Andrea, A., & Kumar, V. (2012). Evaluation of sustainable accounting practices in the italian bioenergy sector. *PAGRI*, 3, 45–62.
- WBGU (German Advisory Council on Global Change). (2009). *World in Transition: Future Bioenergy and Sustainable Land Use*. Earthscan Publications Ltd. London.

CAPÍTULO 13

PRODUCCIÓN Y TECNOLOGÍA RURAL APROPIADA PARA USO FINAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS EN COMUNIDADES RURALES

MARIO MORALES MÁXIMO^{1, 2}
MARTÍN PARRA ALCARAZ²

¹ Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km. 3, Pátzcuaro 61614, Michoacán, México

² Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica S/N, Edificio “D”, Ciudad Universitaria. C.P.58040, Morelia, Michoacán, México..

E-mail: mario.morales@uiim.edu.mx, mapa.cim@gmail.com

Resumen

La producción de biocombustibles sólidos, como pellets o briquetas derivados de biomasa lignocelulósica, es vital para el desarrollo sostenible en comunidades rurales. La tecnología apropiada comunitaria se centra en soluciones adaptadas a las necesidades locales, evitando la adopción indiscriminada de tecnologías avanzadas, reconoce los conocimientos tradicionales y empodera a las comunidades en el diseño, implementación y mantenimiento de tecnologías, garantizando aceptación y sostenibilidad a largo plazo. La implementación de biocombustibles y tecnologías adecuadas puede mejorar la sostenibilidad, resiliencia y calidad de vida en áreas rurales, pero es esencial realizar un análisis integral del contexto local para asegurar efectividad a largo plazo.

Palabras clave: tecnología apropiada, dispositivos de uso final, biocombustibles sólidos.

Introducción

La producción de biocombustibles sólidos (BCS) y la implementación de tecnologías apropiadas en comunidades rurales son aspectos cruciales para el desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida en estas áreas (Morales-Máximo et al., 2018). Los biocombustibles sólidos, como pellets o briquetas derivados de biomasa lignocelulósica, son fuentes de energía renovable que pueden sustituir parcialmente a los combustibles fósiles, reduciendo así la dependencia de recursos no renovables en estas comunidades (Chen et al., 2009). La tecnología apropiada comunitaria busca proporcionar soluciones tecnológicas adaptadas a

las necesidades específicas de las comunidades locales, reconociendo sus conocimientos tradicionales y empoderándolas en el proceso de diseño, implementación y mantenimiento de tecnologías que impactan sus vidas.

La producción de biocombustibles sólidos implica diversos métodos, como el astillado, compactación, residuos a granel, aserrín y carbón vegetal, provenientes de materiales lignocelulósicos como biomasa forestal, agrícola y residuos orgánicos, la fabricación de estos biocombustibles sigue un proceso que incluye triturado, secado, molino de martillos, tamizado y prensado, ya sea de forma industrial o no industrial (Reyes et al., 2016). Los dispositivos que generan biocombustibles sólidos desempeñan un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo el uso responsable de recursos naturales.

Contexto industrial: Tecnología industrializada para la fabricación de biocombustibles sólidos

En el contexto industrial, la tecnología se enfoca en métodos industrializados para la fabricación de biocombustibles sólidos, como pellets y briquetas, la utilización de pelletizadoras y briqueteadoras permite la transformación de materiales de biomasa en formas compactas y adecuadas para su uso como combustible, estos equipos requieren una inversión inicial, pero presentan ventajas como eficiencia energética, bajo impacto ambiental y generación de empleo local; además, se destaca la importancia de cumplir con regulaciones ambientales y de seguridad durante todo el proceso de fabricación (Orisaleye et al., 2020).

Contexto local: Tecnología local, aprovechamiento de la leña para generar energía térmica

En el contexto local, se examina el uso de leña como biocombustible en comunidades rurales, aunque la leña es una fuente de energía renovable y accesible, plantea desafíos ambientales, sociales y de salud, se resalta la importancia de abordar estos desafíos mediante la implementación de tecnologías mejoradas, prácticas sostenibles y opciones de energía alternativas, se exploran ventajas y desafíos asociados con el uso de leña, destacando la disponibilidad local, bajo costo inicial, generación de empleo, pero también señalando problemas como la deforestación, contaminación del aire y riesgos para la salud (Francisco Arriaga et al., 2011). La utilización de la leña como biocombustible en comunidades rurales ha perdurado a lo largo de la historia, siendo una práctica arraigada en la necesidad de cocinar, calentar hogares y llevar a cabo actividades industriales. Aunque la leña es una fuente de energía renovable y localmente abundante, su uso plantea desafíos ambientales, sociales y de salud. La tecnología apropiada comunitaria surge como un enfoque integral para abordar estos desafíos, centrándose en soluciones culturalmente relevantes y sostenibles.

Ventajas de la leña como biocombustible:

- *Disponibilidad local:* La leña suele estar ampliamente disponible en áreas rurales, reduciendo la dependencia de fuentes de energía importadas.
- *Bajo costo inicial:* En muchas comunidades, la leña es una opción económica para la calefacción y la cocina.
- *Generación de empleo:* La recolección y procesamiento de leña pueden impulsar la economía local.

La tecnología apropiada comunitaria

La tecnología apropiada comunitaria emerge como un enfoque culturalmente arraigado para abordar desafíos locales mediante soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades específicas de las comunidades, este contraste con la adopción indiscriminada de tecnologías estándar destaca su compromiso con el desarrollo y la implementación de herramientas sostenibles, accesibles y culturalmente relevantes. Los objetivos fundamentales de esta filosofía incluyen:

Relevancia cultural y local: La integración de soluciones tecnológicas debe alinearse con las prácticas culturales y formas de vida locales, facilitando una aceptación sin contratiempos.

Accesibilidad: Las tecnologías apropiadas comunitarias deben ser diseñadas para ser asequibles y accesibles, eliminando barreras económicas o de infraestructura que podrían obstaculizar su adopción.

Participación comunitaria: La colaboración activa de la comunidad es esencial en todo el proceso, desde la identificación de necesidades hasta la implementación y el mantenimiento de las soluciones tecnológicas.

Capacidad de adaptación: Las tecnologías deben ser flexibles y adaptables para ajustarse a las cambiantes condiciones y necesidades locales con el tiempo.

Participación y empoderamiento: Las comunidades son protagonistas en la toma de decisiones tecnológicas que afectan sus vidas, fomentando la participación activa y el empoderamiento mediante la capacitación.

Adaptación al contexto: Las soluciones tecnológicas deben ser diseñadas considerando el entorno natural, recursos disponibles, cultura y necesidades específicas de la comunidad.

Sostenibilidad: Buscan crear soluciones asequibles, mantenibles y respetuosas con el medio ambiente para garantizar su perdurabilidad.

Transferencia de conocimiento: Valorización y utilización del conocimiento local en el diseño y desarrollo tecnológico, fomentando el intercambio de conocimientos entre generaciones y comunidades.

Uso de recursos locales: Minimizar la dependencia de recursos externos utilizando materiales y habilidades disponibles dentro de la comunidad, fortaleciendo la economía local.

Enfoque holístico: La tecnología apropiada comunitaria no se limita a dispositivos, considera aspectos sociales, económicos y culturales, buscando el bienestar general de la comunidad.

Innovación: Aunque se centra en soluciones simples y accesibles, no descarta la innovación, buscando formas creativas de abordar los desafíos locales.

Los biocombustibles sólidos, derivados de materiales orgánicos como madera, residuos agrícolas, pellets de biomasa y otros subproductos, son utilizados en dispositivos de uso final como estufas, calderas y hornos, ofreciendo una fuente de energía renovable. Este enfoque presenta ventajas notables, pero también desafíos que requieren consideración cuidadosa como se menciona a continuación:

Ventajas de los biocombustibles sólidos

Sostenibilidad ambiental: Contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con combustibles fósiles.

Accesibilidad en áreas remotas: Ofrecen una opción más accesible en áreas rurales donde la infraestructura de energía convencional es limitada.

Gestión sostenible de recursos: Utilizan residuos agrícolas y forestales, fomentando la gestión sostenible de recursos naturales.

Desafíos

Emisiones contaminantes: La combustión puede generar partículas finas y compuestos orgánicos volátiles.

Eficiencia variada: La eficiencia de la combustión varía según el tipo de biocombustible y el dispositivo utilizado.

Disponibilidad y calidad: La constante disponibilidad y calidad de los biocombustibles pueden ser desafiantes.

Impactos ambientales y económicos: Producción y transporte pueden tener impactos ambientales y económicos.

Uso de pellets y briquetas

Ventajas

Eficiencia energética: Alto contenido energético y densidad facilitan manejo y almacenamiento.

Bajo impacto ambiental: Queman de manera más limpia y emiten menos gases de efecto invernadero.

Gestión de residuos: Fabricados a menudo a partir de residuos agrícolas o forestales.

Consideraciones

Costos iniciales: Inversión en equipos puede ser alta, pero se compensa con ahorros en combustible.

Suministro de biomasa: Asegurar suministro constante en áreas rurales.

Almacenamiento: Almacenar en lugar seco para mantener eficiencia energética.

Mantenimiento: Mantenimiento periódico necesario para funcionamiento eficiente y seguro.

Capacitación y educación: Usuarios deben entender la operación y mantenimiento adecuados.

Aplicaciones prácticas de biocombustibles sólidos

Sistemas de calefacción y generación eléctrica: Calderas y sistemas de cogeneración pueden proporcionar calor y electricidad en comunidades rurales.

Generación descentralizada con biocombustibles: Microturbinas de biogás o generadores de biomasa pueden abastecer electricidad a comunidades pequeñas.

Estufas y cocinas de biocombustibles: Diseñadas para quemar biocombustibles eficientemente, mejoran la eficiencia energética y reducen la exposición a humos tóxicos.

Calefacción residencial con pellets de biomasa: Pellets de residuos orgánicos pueden utilizarse para calefacción en regiones frías.

Conclusión

La implementación de tecnologías apropiadas y sostenibles en comunidades rurales es esencial para aprovechar los beneficios de la energía biomásica sin comprometer el medio ambiente ni la salud de las personas; la adopción de briqueteadoras, pelletizadoras y biocombustibles sólidos, junto con principios de tecnología apropiada comunitaria, ofrece soluciones integrales para abordar los desafíos energéticos de manera efectiva y sostenible. Por último, la aplicación efectiva de biocombustibles sólidos en dispositivos de uso final requiere un enfoque integral que considere tanto las ventajas como los desafíos, junto con una cuidadosa atención a las consideraciones prácticas, estas fuentes de energía renovable pueden ofrecer soluciones sostenibles y eficientes, especialmente en entornos rurales o locales.

Referencias

Chen, L., Xing, L., & Han, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2689–2695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.025>

- Francisco Arriaga, F., Guerrero García Rojas, H., Kido Cruz, A., & Cortés Zavala, M. (2011). Ingreso generado por la recolección de recursos forestales en Pichátaro, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 8(1), 107–117.
- Morales-Máximo, M., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Pintor-Ibarra, L. ., & Rutiaga-Quñones, J. . (2018). Materiales densificados con biomasa forestal como alternativa energética en la comunidad de san francisco Pichátaro, Michoacán, México. *Red Mexicana de Bioenergía*, XIV, 168–169. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Orisaleye, J. L., Ojolo, S. J., & Ajilboye, J. S. (2020). Mathematical modelling of die pressure of a screw briquetting machine. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(8), 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.09.004>
- Reyes, L. ., Orihuela, R., Aviña, L. ., Carrillo, A., Pérez, E., & Rutiaga, J. . (2016). Capítulo 2. Generalidades sobre los biocombustibles. In: In A. Carrillo-Parra & J. G. Rutiaga-Quñones (Eds.), *Biocombustibles sólidos* ((1nd ed.), pp. 33–62).

CAPÍTULO 14

RETOS POLÍTICOS Y DE GOBERNANZA ENERGÉTICA, UNA MIRADA DESDE LAS EXPERIENCIAS LOCALES EN MÉXICO

MARÍA LILIANA ÁVALOS RODRÍGUEZ¹
JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES²
JORGE VÍCTOR ALCARAZ VERA³

1 Doctora en Ciencias del Desarrollo Regional, adscrita al Programa de Estancias Posdoctorales por México del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM), Campus Morelia. Correo: lic.ambientalista@gmail.com, teléfono celular: 4434 09 5944

2 Doctor en Ciencias de Materiales Avanzados, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH. Correo: doctor.ambientalista@gmail.com

3 Doctor en Ciencias. Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, UMSNH. Correo: talcarazv@hotmail.com

Resumen

A partir de las conferencias internacionales de Estocolmo, Río, Agenda 21, Kioto, Acuerdo de París, se gesta la necesidad de impulsar principios de protección, prevención y gestión de política ambiental. México incorpora en la ley estos instrumentos que regulan y gestionan el territorio, el ordenamiento ecológico, los impactos ambientales, la educación ambiental, entre otros, teniendo como base la salvaguarda y mejora de los bienes públicos ambientales. Este estudio busca analizar la conexión entre la gobernanza energética y las acciones locales que permitan el éxito de proyectos de innovación energética a partir del manejo forestal comunitario. Los principales hallazgos sugieren que, existen sistemas socioecológicos complejos que a través de una autogestión local en la co producción de saberes colectivos se pueden llevar a cabo acciones tempranas en favor del equilibrio ambiental y justicia climática, particularmente en la generación de energía asequible y renovable como el aprovechamiento de biocombustibles sólidos.

Palabras clave: política ambiental, territorio, actores sociales, gobernanza, descarbonización.

Introducción

La política ambiental es el resultado de compromisos globales en la conservación ecológica y el equilibrio del ambiente y que a partir de los alcances de la economía clásica se apreciaba la distorsión en procesos productivos y de consumo que motivaba la preocupación ecológica, dañando no solo los bienes ambientales, sino li-

mitando los servicios ambientales (Ostrom y Ostrom, 1977, 1997; Buchanan, 1965; Samuelson, 1954).

El papel del Estado sobre el control de los bienes públicos implica regular las conductas que pueden desequilibrar el ambiente, pero también, debe motivar aquellas que apoyan y favorecen el equilibrio ambiental. Es decir, tiene un doble papel en el ejercicio de sus funciones, tanto coercitivo como compensatorio, en el primer caso solo es necesario aplicar la normatividad ambiental y en el segundo implica un acercamiento de convencimiento para reconocer e incentivar las conductas positivas (e. g. el manejo adecuado de residuos, las certificaciones ambientales, las acciones de reforestación y cuidado forestal, entre otras), en estas últimas puede incluso hacer uso de su facultad fiscalizadora para reducir impuestos o lograr subvenciones.

Para lograr las funciones del Estado en la salvaguarda y mejora de los bienes públicos ambientales, existen instrumentos de política pública ambiental (IPPA) que desde lo global son percibidos como herramientas que implican un conjunto de técnicas mediante las cuales las autoridades gubernamentales ejercen el poder en el intento de propiciar un cambio social.

Un IPPA es la herramienta que restringe, promueve, orienta o induce ciertos objetivos de política, sea a través de una aplicación voluntaria o mediante una acción coercitiva (de comando-control).

De acuerdo con Acciai y Capano (2021) la política pública es el conjunto de elementos constitutivos que se interrelacionan en el diseño, aplicación, seguimiento y evaluación de los IPPA que interactúan en diversas escalas y que en la literatura se le ha denominado como un factor híbrido que sugiere la combinación entre la planeación ambiental con la legitimidad y legitimación de dicha política (Ávalos et al., 2021).

En el esquema híbrido recaen los IPPA que sugieren acciones sociales para no generar desequilibrios ecológicos y en ello, la gobernanza tiene un papel central porque implica un proceso de decisiones e interacciones en donde configura la participación de diversos actores en determinado tiempo y espacio (Pahl-Wostl, 2019; Kellogg y Samanta, 2018; Birkenholtz, 2008; Eberhard et al., 2017; Armitage et al., 2012; Lane et al., 2011; Lockwood y Davidson, 2010).

La necesidad de reflexionar sobre las conductas antropogénicas va más allá de la adopción de los IPPA, implica proponer esquemas efectivos de gobernanza ambiental, uno de ellos es el que pretende transitar hacia la descarbonización y generar esquemas resilientes de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático tomando en cuenta condiciones de peligro y riesgo y para lograrlo es necesario evaluar y valorar las capacidades locales de los distintos actores sociales en la adopción de esas estrategias. Esto genera una necesidad de reforzar conocimientos locales que motiven y construyan saberes colectivos de acuerdo a necesidades identificadas.

El objetivo de este proyecto es analizar la conexión entre la gobernanza energética y las acciones locales a través de herramientas de transmisión del conocimiento y la construcción de saberes colectivos, denominadas Escuelas de Campo y que

pueden ser modelos de innovación sistémica que generen espacios de incidencia y eficacia política en casos específicos de Michoacán.

Experiencias globales y locales de innovación sistémica para transitar hacia una gobernanza energética

En Suecia entre el 2016 y 2018 se implementaron programas bajo esta visión, como el BioInnovation y el Re: Source; el primero buscó respaldar una transición completa hacia una economía de base biológica para el 2050, mientras que el segundo promovió una economía circular líder en el mundo que minimice y reutilice los residuos, con un enfoque particular en el suministro de materiales, un sistema de energía sostenible y un uso más eficiente de los recursos en las empresas y la sociedad (Grillitsch et al., 2019).

En el caso de México, una de las experiencias que puede vincularse a la política de innovación sistémica, es el programa denominado Sistema de Innovación del Estado de México (SIEM) impulsado en 2011 por diversos actores globales y locales que buscan el reconocimiento de la interacción y dinamismo de agentes locales de acuerdo a su propio conocimiento. De ahí la importancia de considerar este enfoque comunitario en la estructuración de proyectos energéticos que propicien condiciones de desarrollo regional y que algunos de ellos recaen como IPPA.

Uno de los IPPA son el manejo forestal sustentable entendido como el instrumento de gestión forestal resultante de un proceso de planificación racional basado en la evaluación de las características y el potencial forestal del área a utilizarse, elaborado de acuerdo a las normas y prescripciones de protección y sostenibilidad. Se trata del uso responsable del bosque, las actividades y prácticas aplicables para el rendimiento sostenible, la reposición mejoramiento cualitativo y cuantitativo de los recursos y el mantenimiento del equilibrio del ecosistema (Von et al., 2004).

Hasta ahora se ha identificado que, existen sistemas complejos en diversas escalas espaciales y temporales que son clave en la autogestión local de la co producción de saberes colectivos para llevar a cabo acciones tempranas en favor del equilibrio ambiental y justicia climática que pueden acercar la descarbonización en México y motivar la producción sostenible de energía como la derivada del hidrógeno.

La producción del hidrógeno comercial en México es cercana a las 2,700 toneladas al año y se centra en tres empresas internacionales. Aunque la comunidad académica ofrece hallazgos sobre potencialidad energética del país, aún existen retos que generan barreras sociales y económicas, porque la normatividad presenta áreas de oportunidad en la regulación del hidrógeno que propicie la alineación con los compromisos internacionales como el Acuerdo de París.

Algunos retos políticos para motivar la gobernanza energética en México

Son distintos los retos políticos que enfrenta México para generar una buena gobernanza energética, en primer momento se puede ubicar la alineación normativa

(legalidad)-política (legitimidad)-tecnológica y de innovación (legitimación) que motive el éxito de proyectos descarbonizantes, como el uso del hidrogeno a través de celdas de combustible o bien el aprovechamiento de biomasa, principalmente forestal, agrícola y ganadera, tomando en cuenta las actividades primarias de México.

El uso del hidrogeno es una posible respuesta a la económica circular que motive la transición energética y la descarbonización, generando la gobernanza energética, es solo una de todas las posibilidades, pero quizá pueda ser la más interesante porque algunas agendas globales han apostado a la energía a partir del hidrogeno y actualmente se encuentran operando hojas de ruta que motivan su manejo ambientalmente adecuado.

México forma parte del mercado del hidrógeno, principalmente por la refinería y la petroquímica, aunque del 100% del hidrógeno en México, solo el 1.4% es comercial, el resto sigue siendo producido para autoconsumo en plantas industriales como PEMEX.

Una de las opciones que se han considerado para la generación de hidrógeno verde en México, es el uso de residuos derivados de la industria de pulpa y papel; se han reportado hasta 17 mmole H₂/ reactor, como la cantidad máxima de hidrógeno acumulado al final del periodo de incubación. Además, se ha estudiado la reacción de aluminio con hidróxido de sodio (NaOH), se acuerdo a un consumo de 3878 gramos de NaOH, con 100 latas de aluminio y con una relación molar de Al/NaOH =2, se pueden producir hasta 5.35 kW/hora a un costo de \$3.9 pesos mexicanos (Martínez y Perry, 2015).

Reflexiones finales

Existen diversas perspectivas que apuntan a considerar que México tiene los elementos ecológicos para pensar en la descarbonización inmediata, porque cuenta con riqueza natural que ofrecería alternativas viables en el impulso de energías renovables. Sin embargo, lograr la transición energética es un reto que va más allá de la existencia de vías de energía renovable, le anteceden aspectos económicos y sociales que, sin duda, pueden colocarse como prioritarios en las agendas públicas y que son elementos clave para motivar la gobernanza energética.

Agradecimientos

Al Programa de Estancias Posdoctorales por México del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), al Centro de Investigación en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia; a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en especial, a todas las personas que hicieron aportaciones, correcciones y sugerencias al documento.

Referencias

- Acciai, C., & Capano, G. (2021). Policy instruments at work: A meta analysis of their applications. *Public Administration*, 99(1), 118-136.
- Armitage, D., Loe, R., Plummer, R., 2012. Environmental governance and its implications for conservation practice. *Conserv. Lett.* 5, 245-255.
- Ávalos-Rodríguez, M. L., McCall, M. K., Špirić, J., Ramírez, M. I., & Alvarado, J. J. (2021). Analysis of indicators of legality, legitimacy and legitimation in public policy: an example of REDD+ in Mexico. *International Forestry Review*, 23(2), 127-138.
- Birkenholtz, T., 2008. Contesting expertise: the politics of environmental knowledge in northern Indian groundwater practices. *Geoforum* 39, 466-482.
- Buchanan, J.M., 1965. An economic theory of clubs. *Economica* 32, 1-14.
- Eberhard, R., Margerum, R., Vella, K., Mayere, S., Taylor, B., 2017. The practice of water policy governance networks: an international comparative case study analysis. *Soc. Nat. Resour.* 30, 453-470. <https://doi.org/10.1080/08941920.2016.1272728>.
- Grillitsch, M., Hansen, T., Coenen, L., Miörner, J., & Moodysson, J. (2019). Innovation policy for system-wide transformation: The case of strategic innovation programmes (SIPs) in Sweden. *Research Policy*, 48(4), 1048-1061.
- Kellogg, W.A., Samanta, A., 2018. Network structure and adaptive capacity in watershed governance. *J. Environ. Plan. Manag.* 61, 25-48. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1287063>.
- Lane, S.N., Odoni, N., Landstrom, C., Whatmore, S.J., Ward, N., Bradley, S., 2011. Doing flood risk science differently: an experiment in radical scientific method. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 36, 15-36.
- Lockwood, M., Davidson, J., 2010. Environmental governance and the hybrid regime of Australian natural resource management. *Geoforum* 41, 388-398. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.12.001>.
- Martínez, N., y Espejel, I. (2015). La investigación de la gobernanza en México y su aplicabilidad ambiental. *Economía, sociedad y territorio*, 15(47), 153-183. doi: <https://doi.org/10.22136/est002015557>
- Ostrom, V., Ostrom, E., 1977. A theory for institutional analysis of Common Pool problems. In: Hardin, G., Baden, J. (Eds.), *Managing the Commons*. W.H. Freeman, San Francisco, CA, pp. 157-172.
- Ostrom, V., Ostrom, E., 1997. public goods and public choices. In: Savas, E.S. (Ed.), *Alternatives for Delivering Public Services: Toward Improved Performance*. Westview Pres., Boulder, CO, pp. 7-49.
- Pahl-Wostl, C., 2019. The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environ. Sci. Policy* 91, 6-16.
- Samuelson, P.A., 1954. The pure theory of public expenditure. *Rev. Econ. Stat.* 36, 387-389.

Von Gadow, K., Orois, S. S., & Calderón, O. A. A. (2004). Manejo forestal con bases científicas. *Madera y Bosques*, 10(2), 3-16.

SEMBLANZAS DE LOS COORDINADORES



El **Dr. Luis Bernardo López Sosa** es Licenciado en Desarrollo Sustentable; Maestro en Ciencias en Ingeniería Física y Doctor en Ciencias en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es profesor investigador y miembro del núcleo académico básico de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética y del Doctorado en Ciencias para la Sostenibilidad e Interculturalidad, de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I, y Perfil Deseable PRODEP. Ha sido investigador invitado en el College of Technology de la Universidad de Houston y la Universidad Carlos III de Madrid en España; también posee un posdoctorado en la UNAM sobre sistemas energéticos rurales sustentables. Es fundador y director del Centro Juvenil para el Desarrollo de Ecotécnicas en Michoacán. Posee 1 patente otorgada y 3 más en trámite, ha publicado 4 libros, y más de 35 artículos de investigación, divulgación y en revistas indexadas de alto impacto del Journal Citation Reports. Por sus actividades de vinculación e investigación ha recibido diversos reconocimientos a nivel estatal, nacional e internacional, entre los que destacan: la Medalla al Mérito Universitario en 2021 por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el Premio Luis Elizondo del Tecnológico de Monterrey en 2018, Premio Nacional al Mérito Ecológico en 2018, Premio Estatal de Ciencias en 2017, el Premio Nacional de la Juventud en 2015 por la Presidencia de la República, Ganador del VII Certamen Internacional de Ciencia e Ingeniería en Santiago de Chile en 2013 y el Premio Universidad del Valle de México en 2014.



El **Dr. Mario Morales Máximo** es licenciado en Desarrollo Sustentable con especialidad en Tecnologías alternativas por la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM). Cuenta con una maestría y doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo titulado con mención honorífica en ambos posgrados.

Es miembro, fundador y docente del núcleo académico de la Maestría en Ingeniería para Sostenibilidad Energética (MISE) programa académico único de maestría en el país. Asimismo, es coordinador y miembro del núcleo académico de la Maestría en Educación Ambiental (MEA) de la UIIM. Ha sido revisor de distintos trabajos académicos a nivel estatal, nacional e internacional a través comités científicos para el Gobierno del Estado de Veracruz a través del Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (COVEICYDET), así como del instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán. Así como revisor para la revista *Current Journal of Applied Science and Technology* y de la *Scientific Reports* de la editorial Springer. Ha generado distintas charlas educativas en distintas instituciones en el estado y el extranjero como la universidad católica de salta (UCASAL-ARGENTINA). Cuenta con 30 artículos publicados en memorias arbitradas, en temas como forestal, ecotecnologías solares, química de la madera, diseño de interior, vivienda sustentable, aprovechamiento de la resina, biocombustibles sólidos entre otras áreas de investigación. Además de 10 artículos indexados en revistas científicas del Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), de circulación internacional. Cuenta con varios reconocimientos, a nivel estatal, obtuvo Mención honorífica en el premio Michoacano de la juventud dos años consecutivos 2017 y 2018. Cuenta con el premio estatal de divulgación científica y tecnológica por el ICTI recibido en el año 2018. Obtuvo el premio Nacional, Luis Elizondo por el tecnológico de monterrey campus monterrey nuevo león México en el año 2018. Ha sido invitado a colaborar como técnico académico en el clúster de biocombustibles sólidos una red enfocada al uso eficiente de la biomasa, y del cual sigue siendo miembro. Ha colaborado en proyectos tecnológicos financiados por el CONACYT. Así como proyectos de investigación científica y tecnológica con la ENES-UNAM campus Morelia. Ha sido profesor invitado en la ENES-UNAM campus Morelia. Profesor invitado en la MISE-UIIM, Unidad Zamora, Michoacán México. Profesor invitado en la ENES-UNAM, Campus Morelia, Michoacán México. Profesor invitado de la UTEC Morelia, Michoacán México. Profesor invitado de la UIIM (unidad Zacapu y Zamora), Michoacán México. Así mismo de forma independiente genera las líneas de investigación en: Aprovechamiento y caracterización de materiales lignocelulósicos para la generación de bioenergía, Propuestas de evaluación energética en el sector rural a través de la bioenergía, Diseño, análisis y modelado bioclimático de viviendas sostenibles, Diseño de interiores sostenibles, Diseño y modelado de tecnologías sostenibles.

SEMBLANZAS DE LOS AUTORES Y AUTORAS



José Guadalupe Rutiaga Quiñones es ingeniero en Tecnología de la Madera por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (México), y con especialidad en celulosa y papel por la misma institución. Tiene estudios de maestría en ciencias por la Universidad de Guadalajara (México) y de doctorado por la Universidad Técnica de Múnich (Alemania). Trabaja en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, adscrito a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera d. En esta Facultad fue jefe de la División de Estudios de Posgrado (2003-2008), logrando que el Programa de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera quedara registrado en el PIFOP 2.0 (2004) y luego en el PNPC (2008). También fungió como director de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (2016-2020) y sus principales logros fueron la reestructuración del plan de estudios de la Licenciatura y el reconocimiento al Programa de Licenciatura por parte de los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior, A. C. (CIEES), con nivel 1 (máximo nivel). Su trabajo de investigación se centra en la química de materiales lignocelulósicos, biocombustibles sólidos, además de celulosa y papel. Ha sido responsable de diversos proyectos de investigación aprobados por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fondos Mixtos CONACYT – Gobierno de Michoacán, CONACYT y SENER-CONACYT. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y tiene Reconocimiento de Perfil Deseable. Ha contribuido a la formación de recursos humanos en licenciatura (40), maestría (31) y doctorado (8). Ha publicado tres libros y algunos capítulos de libro. En los últimos 5 años, tiene 45 artículos publicados y 72 participaciones en congresos.



El **Dr. José Juan Alvarado Flores** es de formación es ingeniero en Tecnología de la Madera y cuenta con Posgrado de Maestría y Doctorado en Ciencias, así como dos estancias Postdoctorales (UMSNH-UNAM). Desde 2014 pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, actualmente Nivel 1. Cuenta con el Reconocimiento a Perfil Deseable del PRODEP. Renovación por 3 años

más en 2022 (2022-2025). Referente a su trabajo de investigación, se cuentan con 35 publicaciones JCR en el área de energía (residuos de materiales lignocelulósicos, celdas de combustible y tecnología del hidrógeno). Se respaldan diversas tesis de Posgrado (Maestría y Doctorado) y Licenciatura. Se cultiva la línea de Investigación de Bio-Energía a partir del estudio de la Cinética de procesos térmicos de materiales lignocelulósicos y agro-forestales. Su experiencia Docente en Posgrado y Licenciatura está centrada en el área de Bioenergía, Matemáticas-Física-Química (varios niveles), Termodinámica, Mecánica Vectorial, Mecánica de Materiales, Tecnología y Resistencia de Materiales, Técnicas de Estudio, Tópicos Selectos de Ingeniería Ambiental y Caracterización de Materiales lignocelulósicos. Se tiene experiencia en técnicas de Análisis de Cinética en Procesos Termogravimétricos (TGA-DTG), Modelado Matemático, Difracción de Rayos X (XRD), Análisis Rietveld, Cristalografía, Microscopía Electrónica (SEM-TEM) y síntesis de materiales. Derivado de sus investigaciones, se han presentado diversos trabajos a nivel internacional (EE. UU. y España) y nacional en varios estados de la república.



Fernando Daniel Méndez Zetina es ingeniero en Tecnología de la Madera por la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo (UMSNH), actualmente se encuentra cursando la Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera en la UMSNH. Sus principales líneas de investigación están relacionadas con la caracterización química, energética y termogravimetría (TGA-DTG) de materiales lignocelulósicos. Entre sus principales reconocimientos se encuentra el premio al padre

de la patria otorgado por la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, además de obtener el mejor promedio del área química de la carrera de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Ha participado como ponente en dos congresos nacionales y en 3 eventos regionales de divulgación de la ciencia. Cuenta con 10 cursos de actualización profesional.



Luis Fernando Pintor Ibarra es egresado de licenciatura y maestría en ciencias de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en el año 2016. Desde ese momento la caracterización química y el aprovechamiento energético de la biomasa han sido sus principales líneas de investigación. Actualmente es académico de la UMSNH. Es autor y coautor de 20 artículos científicos en revistas de la Journal Citation Reports. También ha

dirigido 5 tesis de licenciatura y 2 de maestría, ha colaborado en 5 proyectos de investigación algunos de ellos financiados por el CONAHACYT, ha presentado distintos trabajos de investigación en 20 congresos nacionales y 5 internacionales. Entre los principales reconocimientos obtenidos: en 3 ocasiones el premio “Padre de la Patria” otorgado por la UMSNH, obtuvo el mejor promedio de aprovechamiento académico de la generación 2008-2013, en la licenciatura de Ingeniería en Tecno-

logía de la Madera y la obtención del grado de maestría en ciencias con mención honorífica. Actualmente cuenta con más de 150 citas en el Google académico.



El Dr. Artemio Carrillo Parra es ingeniero forestal en 1990; Maestro en Ciencias Forestales en 2003, ambos grados obtenidos en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. PhD. en Biología y Tecnología de la Madera por la Universidad Georg-August en Göttingen, Alemania en el 2007. Perfil PROMEP, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I. Profesor Investigador desde 2015 del Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera

de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Responsable de las asignaturas Industrias Forestales, Productos forestales, Anatomía especializada de la madera y Biocombustibles sólidos. Miembro de la Red Iberoamericana de Eficiencia Térmica Industrial (RIETI), Red IBEROMASA, ambas del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), responsable de la Línea 2 (Caracterización de Biocombustibles Sólidos) del Clúster de Biocombustibles Sólidos (CONACYT-SENER). Director de tesis de alumnos de Doctorado, Maestría y Licenciatura. Revisor de revistas indizadas como *Agrociencia*, *American Journal of Plant Sciences*, *Forests*, *BioEnergy Research*, *bioresources*, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, *Madera y Bosques*, *Polymers*, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* y *Revista Electrónica Nova Scientia*. Editor de las revistas *Energies*, *Agrociencias* y *Madera y Bosques*.



La Dra. María Liliana Ávalos Rodríguez es doctora en Ciencias del Desarrollo Regional por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Maestra en Derecho y Gestión Ambiental por parte del Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán y Licenciada en Derecho por parte de la UMSNH. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) nivel I del CONAHCYT y es Investigadora Estatal Honorífica por parte del

Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán. Ha publicado más de 20 artículos científicos y de divulgación en revistas con reconocimiento internacional y nacional de alto impacto (JCR- *Journal Citation Reports*); libros y diversos capítulos de libro. Ha colaborado en proyectos CONAHCY y Programas de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT-UNAM. Ha asesorado tesis de posgrado y participado en diversos comités de grado, así como en revisiones de manuscritos de alto impacto y comisiones del CONAHCYT. Ha impartido cátedras en licenciatura, maestría y doctorado y ha colaborado en el sector público, privado, social y académico. Sus principales líneas de investigación son legislación y política ambiental, gobernanza ambiental, degradación forestal, marco normativo mexicano de las energías alternas, manejo de residuos peligrosos, valoración económica ambiental entre otras.



El **Dr. Arturo Aguilera Mandujano** es licenciado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Manufactura, por el Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia. Maestro en Ingeniería Mecánica y Doctor en Ciencias en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es profesor investigador y miembro del núcleo académico básico de la Maestría en Educación Ambiental. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel candidato. Realizó una estancia de investigación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Sus líneas de investigación se enfocan en el desarrollo y caracterización de materiales y nanomateriales para procesos de sostenibilidad energética. Ha publicado más de 8 artículos de investigación en revistas indexadas de alto impacto y es docente en la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán.



El **Dr. Serafin Colín Urieta** tiene un Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales cursado en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León en el Departamento de Tecnología de la Madera, la maestría en Ciencia y Tecnología de la Madera y es Ingeniero en Tecnología de la Madera ambas cursadas en la Facultad de Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Sus líneas de investigación son los productos de la madera, productos químicos de extraíbles, química y física de madera, durabilidad de la madera, y la caracterización de biocombustibles sólidos. Es autor de varios artículos publicados en diversas revistas científicas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Se ha desempeñado como docente en los Laboratorios de química, Química de la madera, Productos químicos de la lignina, Química de los extraíbles y Laboratorio de pulpa y papel de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Ha colaborado con profesores investigadores del Clúster de Biocombustibles Sólidos pertenecientes a varias universidades. Actualmente es Profesor Investigador en la carrera de Ingeniería en Innovación Tecnológica Sustentable de la Universidad Intercultural Indigenista de Michoacán.



El **Dr. Víctor Ruiz** es doctor en ingeniería en energía por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con especialidad en energía y medio ambiente. Actualmente, es investigador en la UNAM y en el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) como parte del programa investigadores por México, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores, es secretario del comité de la Norma Mexicana de Estufas que funcionan con Leña y de la Red

Latinoamericana y del Caribe de Cocción Limpia (RLCCL), ha sido delegado nacional en los comités internacionales ISO, es investigador Honorífico del Estado de Michoacán en donde recibió el Premio Estatal de Tecnología. Ha asesorado 19 tesis, ha impartido más de 60 ponencias nacionales e internacionales, y ha publicado 17 artículos científicos en revistas indizadas y 4 capítulos de libro en temas de bioenergía, innovación ecotecnológica, evaluación y monitoreo por el uso de los bioenergéticos, análisis de impactos y política pública. Tiene experiencia en dirigir y colaborar con grupos de trabajo inter y trans-disciplinarios. Su evolución académica-científica involucra desde participaciones en programas locales con el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT) para la divulgación de la ciencia en zonas rurales de Michoacán, hasta proyectos internacionales financiados por la Fundación de la Naciones Unidas.



El **Dr. Carlos A. García** es ingeniero en Electrónica y Comunicaciones por la Universidad Iberoamericana Puebla. Cuenta con maestría y doctorado en Ingeniería (Energía) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene experiencia profesional en la industria y en la consultoría. Actualmente es Profesor Titular en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la UNAM donde también es responsable del Laboratorio de Ecotecnología. Sus áreas de enseñanza e investigación incluyen la Prospectiva energética, Análisis de Ciclo de Vida, Evaluaciones de sustentabilidad y el desarrollo de tecnología para aplicaciones energéticas a nivel rural. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I.

*Aplicaciones energéticas de la biomasa: propuesta divulgativa
para el acceso universal del conocimiento,*
de Mario Morales Máximo y Luis Bernardo López Sosa (coordinadores),
editado por la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán,
se terminó de imprimir en mayo de 2024,
en los talleres gráficos de Editorial Cienpuzuelos, S.A. de C.V.,
en Morelia, Michoacán, México.

