

“Aplicaciones energéticas de la biomasa: perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos”, es una obra colaborativa entre investigadores, especialistas en diversas áreas de la bioenergía y la sustentabilidad, pertenecientes a 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. Que articulados por académicos de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, han elaborado este material de consulta básica e introductorio sobre el aprovechamiento energético de la biomasa. Es un documento dirigido a estudiantes, docentes, productores, miembros de comunidades rurales e indígenas, autoridades locales, investigadores, tecnólogos y emprendedores; interesados en conocer aspectos generales desde la ciencia básica y caracterización de recursos biomásicos, hasta la estimación del potencial energético de forma teórica y geográfica, considerando también el análisis de los impactos económicos, políticos, ambientales y socio-tecnológicos, que se relacionan con cadenas energéticamente productivas para generar biocombustibles sólidos a partir de los recursos biomásicos de primer uso o residuales. Se espera que esta obra sea de utilidad para incentivar la transición energética y tecnología para fomentar escenarios alternativos, justos y sostenibles que permitan la democratización de la energía desde un enfoque local.

UNIVERSIDAD INTERCULTURAL INDÍGENA DE MICHOACÁN



UIIM

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

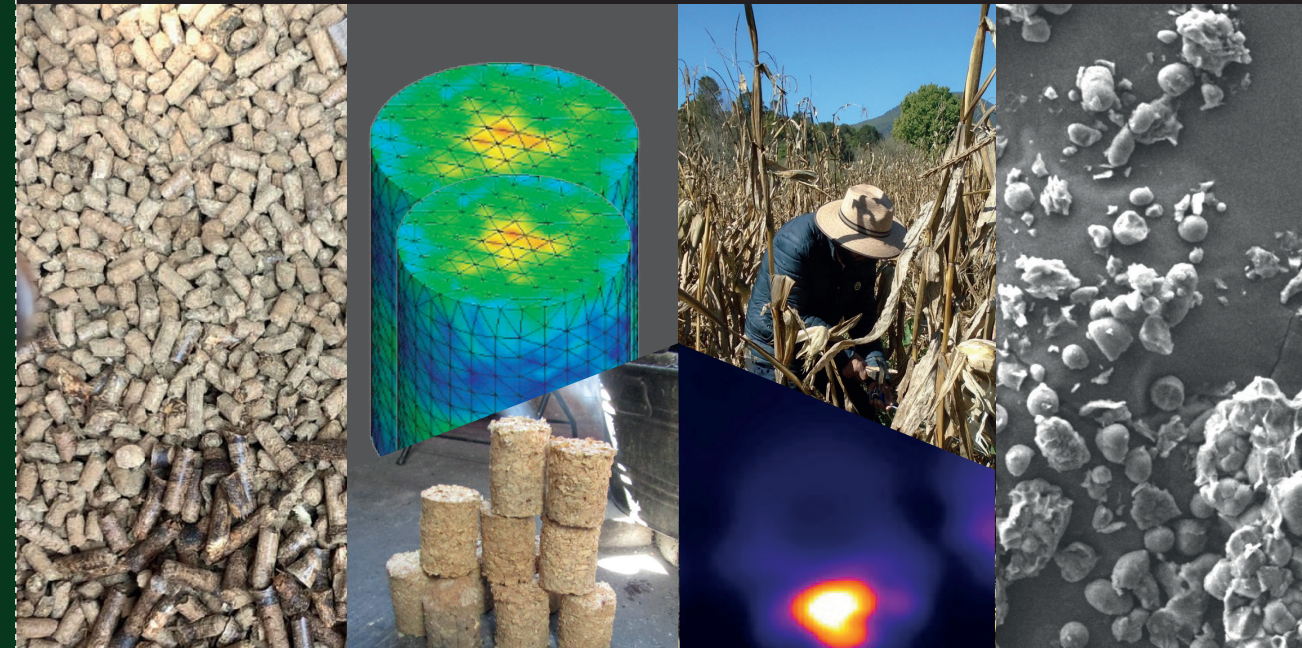
prodep
TIPO SUPERIOR

PROGRAMA PARA EL DESARROLLO PROFESIONAL
DOCENTE PARA EL EJERCICIO FISCAL 2023

Aplicaciones energéticas de la biomasa: Perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos

Aplicaciones energéticas de la biomasa:

Perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos



Luis Bernardo López Sosa & Mario Morales Máximo
Coordinadores





Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Material de consulta y libre acceso
Universidad Intercultural Indígena de Michoacán





Aplicaciones Energéticas de la biomasa:
perspectivas para la caracterización local de
biocombustibles sólidos.

Primera Edición
Pátzcuaro, Michoacán, México.
Octubre del 2023

Coordinadores:
Luis Bernardo López Sosa
Mario Morales Máximo

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

ISBN: 978-607-9386-10-8

Cada capítulo 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.



ÍNDICE

PRÓLOGO	5
AGRADECIMIENTOS	7
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	9
CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA BIOMASA DISPONIBLE DE FORMA LOCAL	23
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA	37
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA EN RECURSOS BIOMÁSICOS.....	65
CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN PROXIMAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	87
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ELEMENTAL EN LA BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS	117
CAPÍTULO 7: MICROANÁLISIS DE LA CENIZA DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA.....	135
CAPÍTULO 8: ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO APLICADO A LA CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	167
CAPÍTULO 9: CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA: PODER CALORÍFICO, COMPUESTOS POLIMÉRICOS.....	195
CAPÍTULO 10: MONITOREO DE EMISIONES POR EL USO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	223
CAPÍTULO 11: APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	239
CAPÍTULO 12: SUSTENTABILIDAD DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	253
CAPÍTULO 13: PRODUCCIÓN Y TECNOLOGÍA RURAL APROPIADA PARA USO FINAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS EN COMUNIDADES RURALES	275
CAPÍTULO 14: RETOS POLÍTICOS Y DE GOBERNANZA ENERGÉTICA, UNA MIRADA DESDE LAS EXPERIENCIAS LOCALES EN MÉXICO .	299
SEMBLANZA DE AUTORES.....	328

PRÓLOGO

En el presente, la demanda de recursos para satisfacer las necesidades básicas como la alimentación, el acceso al agua, la vivienda, la gestión de residuos y el acceso a la energía, cada vez es mayor, más agresiva y desigual; desvinculada de un concepto armónico y de buen vivir, y orientada hacia procesos de índoles productivistas y mercantiles. Es imperante repensar las formas tradicionales de consumo y nuestras necesidades actuales; pensar en los requerimientos diarios sin comprometer los de las generaciones futuras. Al ritmo de las demandas presentes, no habrá planeta que alcance para atender dichas necesidades, que para muchos son consideradas como básicas.

El acceso a la energía es una demanda básica que de origen guarda una esencia de arraigo con la naturaleza y una percepción especial en los pueblos y comunidades indígenas. Son de quienes la sociedad contemporánea puede aprender y crecer. En ellos radica un conocimiento tradicional y esquemas de gobernanza y formas de vida que les han permitido preservar su cultura y su lengua, sinónimo de sostenibilidad y defensa de lo que son y de lo que perdura. En este sentido, la presente obra guarda especial vínculo con las formas de gestión de la energía de las comunidades indígenas del estado de Michoacán. Precisamente, derivado de la experiencia

de trabajo con estas poblaciones, nació el interés por generar un material bibliográfico de consulta directa, que permitiera mediante un lenguaje sencillo y de alcance robusto, inducir a todas aquellas personas que tengan interés por el aprovechamiento de los recursos biomásicos, aprender y formarse inicialmente en los temas relacionados con la bioenergía.

Este libro pretende ser un material de disposición digital y consulta pública en bibliotecas comunitarias, puesto al alcance de poblaciones rurales e indígenas con el interés mencionado. Pero no limitativo, y también de acceso para la comunidad académica.

En particular, es una obra que enfatiza sobre la importancia de utilizar todos aquellos recursos biomásicos que están presentes en el sector forestal, agrícola o agroindustrial, en los pequeños y grandes productores, en las zonas urbanas o en las ciudades. Y cuyo interés sea la generación de energías alternativas que fomenten la transición hacia un sistema más justo, democrático y sustentable.

Es por lo anterior que se invita a los lectores a explorar los diversos capítulos que esta obra aborda y que fueron escritos por especialistas en los temas de redacción, provenientes de diferentes universidades y distintos lugares de la república mexicana. *Aplicaciones energéticas de la biomasa* es un material que se ciñe a los principios de sustentabilidad y buen vivir, que se asumen desde el aprovechamiento de la bioenergía para la satisfacción de necesidades energéticas básicas.

Luis Bernardo López Sosa

Agradecimientos

Los autores de esta obra agradecen a los pueblos y comunidades indígenas de Michoacán con los que nació la motivación por producir esta obra de consulta, que buscar ser una herramienta de acceso abierto para incentivar el aprovechamiento de la bioenergía de forma local y de manera sustentable. También se agradece el apoyo del financiamiento para la producción de este material al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP-2023) de la Secretaría de Educación Pública del Gobierno de México. Además de agradecer a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, que, a través del comité editorial universitario, el equipo del departamento de difusión cultural, publicaciones y educación continua y el departamento de bibliotecas y medios audiovisuales, apoyaron en la edición de este ejemplar.

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 los combustibles de origen fósil. La biomasa está disponible a partir de residuos forestales y maderables, además de diferentes residuos agroindustriales, residuos sólidos urbanos orgánicos, y por supuesto de los cultivos energéticos, y posicionan a la

bioenergía como una fuente local y versátil, que puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Este tipo de biomasa y los biocombustibles sólidos densificados 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. Sobre este planteamiento se discute en este capítulo, desde las generalidades hasta los tipos de biocombustibles sólidos que existen y sus beneficios en el uso continuo.

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

Introducción

Las fuentes de energía renovable son una 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). 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). Su amplia disponibilidad, a partir de residuos agrícolas, forestales y de la industria de la madera, así como de cultivos energéticos, la convierte en una fuente de energía local y versátil, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Es una opción de energía que puede ser utilizada de diversas maneras, incluyendo la producción de biogás, etanol, biodiesel, calor y electricidad a través de tecnologías como la gasificación, la fermentación y la pirólisis, esto permite una mayor flexibilidad en su aplicación, adaptándose a las necesidades específicas de cada región o sector (Guo et al., 2015), así, de manera general existen biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos (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).

Los biocombustibles sólidos desempeñan un papel importante en la transición hacia una matriz energética más limpia y amigable con el medio ambiente, y como ya se mencionó, pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los recursos no renovables, son una parte esencial del panorama energético actual y futuro, y su uso responsable puede contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y la promoción de una economía más verde, la creación de empleos locales y el fomento del desarrollo rural sostenible como la necesidad de desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles.

Biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos son una categoría de biocombustibles derivados de materiales lignocelulósicos. Estos biocombustibles sólidos 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:

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.

En los siguientes apartados se describe se comenta sobre los biocombustibles sólidos densificados (pellets y briquetas) derivados de subproductos lignocelulósicos.

Pellets

En Hispanoamérica y España, indistintamente se emplean los términos “pélet” o “pellet” (Camps y Marcos, 2008); en este caso se utilizará el término de pellet. Se trata de cilindros que son obtenidos por compactación del material lignocelulósico en prensas cilíndricas. Brevemente, el material es alimentado a la tolva del equipo de peletizado y es empujado contra la matriz que cuenta con orificios circulares por donde finalmente salen los pellets. El material a peletizar deberá cumplir con ciertas condiciones, como

contenido de humedad (suele ser 12%, base seca) y tamaño de partícula (suele ser menor a 2 cm); el diámetro de los pellets estará en función del diámetro del orificio de la matriz. Las actividades principales para la obtención de pellets son la preparación en dimensiones de la biomasa, su secado (con frecuencia, el material lignocelulósico tiene altos contenidos de humedad) y en proceso de peletizado. Después, para la línea de flujo, en general las siguientes etapas serían el cribado, compactado (proceso de peletizado), enfriado y envasado de los pellets (Camps y Marcos, 2008).

Briquetas

Las briquetas biocombustibles también son formadas por compactación de la biomasa lignocelulósica. La forma suele ser cilíndrica, pero puede haber otras (Figura 1). Además de las briquetas de madera, suelen encontrarse de corteza, de restos de diferentes tipos de papel y de cartón, restos de tableros contrachapados, restos de tableros de partículas, restos de tableros de fibras, polvos de lijado, y mezclas de algodón, pajas y de otros residuos agrícolas. La línea de flujo para la obtención de briquetas es similar para obtener pellets, en cuyo caso la compactación se dará en la briqueteadora, y pueden ocurrir transformaciones químicas por el calentamiento del material dentro de la máquina briqueteadora (Camps y Marcos, 2008). Pero también pueden formarse briquetas sin necesidad de alta presión y a temperatura ambiente (Morales-Máximo et al., 2020).

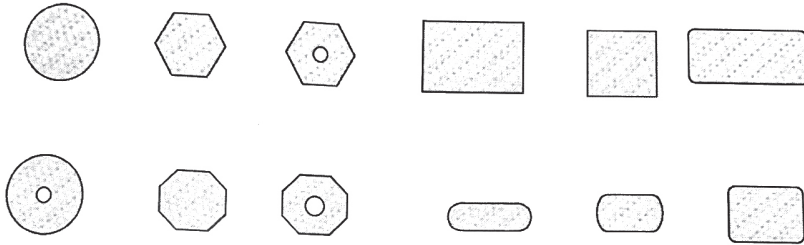


Figura 1. Secciones comunes en las briquetas biocombustibles (Camps y Marcos, 2008).

Características y propiedades de los pellets y las briquetas

Las principales características y propiedades de estos biocombustibles sólidos aparecen en la Figura 2 (Camps y Marcos, 2008).

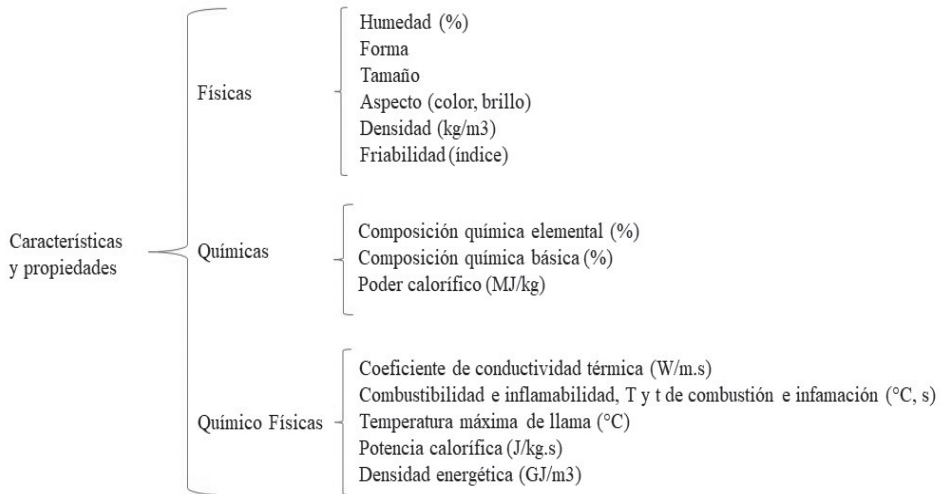


Figura 2. Principales características y propiedades de los pellets y de las briquetas.

Aunque, en los diferentes reportes que se encuentran en la literatura científica, no siempre se incluyen la totalidad de estas características y propiedades, y es común encontrar datos sobre análisis proximal y algunas propiedades de resistencia mecánica. En la Tabla 2 se pueden apreciar algunos datos para pellets y briquetas elaboradas a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica.

Tabla 2. Algunas características de pellets y briquetas a partir de diversas biomásas.

BCSD	Biomasa	H	D P	D G	IR I	RC	D M	M V	C	CF	PC
Pellets	Aserrín de pino ^a	5.6	1.3 4	67 0	10 8			89. 3	0.4 4	10. 3	18. 4
	Residuos de palma ^a	6.5	1.1 8	54 0	15 8			79. 4	0.5 4	20. 1	21. 9
	Bagazo de mezcal ^b	5.8	1.3 7					74. 9	6.6	12. 5	17. 3
	Bagazo de tequila ^b	6.6	1.2 8					79. 6	10. 5	9.9	17. 1
	Poda de manzano ^b	5.1	1.3 2					80. 4	2.5	16. 5	19. 7
	Aserrín de juniperus ^b	5.0	1.3 6					78. 0	0.4 4	21. 5	21. 4
	Podas de guayaba ^c	7.5	1.0 5	60 7	90			85. 3	1.7	13. 1	19. 5
	Podas de aguacate ^d	8.9	1.1 9	58 1			86. 7	83. 9	1.2	8.3	19. 6
Briquetas	Aserrín de <i>Pinus pseudostrabus</i> ^e	6.8	0.9 4			75		79. 8	0.8 7	12. 6	18. 4
	Aserrín de pino ^f	11. 5 a	0.9 3 a					91. 3 a	0.4 9 a	7.9 a	17 a

		13.3	1.24				95.0	1.55	34.5	18.3
	Aserrín de pino ^g	4.1 a 7.2	0.81 a 1.01		47 a 20.0	4.9 a 40.8*	82.9 a 90.7	0.1 a 1.1	8.9 a 16.4	20.5 a 22.8
	Aserrín de latifoliada ^h	5.1 a 8.8	1.06 a 1.21		47 a 20.0	10.4 a 98.6*	79.6 a 90.9	1.2 a 3.9	7.8 a 16.6	19.2 a 21.2

BCSD = biocombustible sólido densificado; H = humedad (%); DP = densidad de partícula (g/cm³); DG = densidad a granel (kg/m³); IRI = índice de resistencia al impacto; RC = resistencia a la compresión (MPa); DM = durabilidad mecánica (%); MV = material volátil (%); C = ceniza (%); CF = carbono fijo (%); PC = poder calorífico (MJ/kg); *N/mm.

^aCarrillo-Parra et al. (2020); ^bCarrillo-Parra et al. (2021); ^cRuiz-García et al. (2022); ^dSoria-González et al. (2022); ^eCarrillo-Parra et al. (2018); ^fMorales-Máximo et al. (2020); ^gRamírez-Ramírez et al. (2021); ^hRamírez-Ramírez et al. (2022).

Conclusiones

Los biocombustibles sólidos son una opción importante en la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles y limpias; su uso adecuado y sostenible puede contribuir a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático, sin embargo, es importante abordar los desafíos relacionados con la gestión de la cadena de suministro y la eficiencia en la combustión para maximizar sus beneficios ambientales.

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.
- Carrillo-Parra, A., Contreras-Trejo, J. C., Pompa-García, M., Pulgarín-Gámiz, M. A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Pámanes-Carrasco, G. & Ngangyo-Heya, M. (2020). Agropellets from oil palm residues/pine sawdust mixtures: Relationships of their physical, mechanical and energetic properties, with the raw material chemical structure. *Appl. Sci.* 10: 6383 (1-12p). doi: 10.3390/app10186383
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Ríos-Saucedo, J. C., Ruiz-García, V. M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berúmen, C. A. & Núñez-Retana, V. D. (2021). Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. *BioEnergy Research* (1-10).
<https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Carrillo-Parra, A., Contreras Ortiz, E., Garza-Ocañas, F., Ngangyo Heya, M. y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Efecto de la intemperización y proceso en las características físicas, mecánicas y energéticas de briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(50): 496-513. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.239>

- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- 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
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C. & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources* 16(2): 2249-2263. DOI: 10.15376/biores.16.2.2249-2263
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J. J., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N. & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Evaluation of selected physical and thermal properties of briquette hardwood biomass biofuel. *BioEnergy Research* (1-8). <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Ruiz-García, V. M., Huerta-Mendez, M. Y., Vázquez-Tinoco, J. C., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., López-Albarrán, P., & Masera, O. & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Pellets from

lignocellulosic material obtained from pruning guava trees: characterization, energy performance and emissions. *Sustainability* 14(3), 1336 (1-15). <https://doi.org/10.3390/su14031336>

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, Mexico*

² *Escuela de Diseño de Interiores y Ambientación, de la Universidad Vasco de Quiroga Blvd Juan Pablo II #555, Santa Maria de Guido, 58090 Morelia, Michoacán, México.*

E-mail: mario.morales@uiim.edu.mx, mmoralesmaximo@uvaq.edu.mx

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

Resumen

El diagnóstico de necesidades energéticas a través de la biomasa implica evaluar y comprender la demanda de energía de una determinada región, comunidad o sistema, y luego identificar cómo la biomasa podría ser utilizada para satisfacer esas necesidades de manera eficiente y sostenible, este diagnóstico implica un enfoque integral que considera factores técnicos, ambientales, económicos y sociales para determinar cómo la biomasa puede contribuir de manera efectiva y sostenible al suministro de energía en una región específica. El primer paso en esta evaluación es la realización de un diagnóstico de la biomasa

disponible localmente; el cual es un proceso integral que combina la recopilación de datos, análisis técnico y consideraciones económicas y ambientales para informar sobre el potencial y los usos sostenibles de los recursos biomásicos y lignocelulósicos presentes en una localidad específica, es un proceso multidisciplinario que requiere una comprensión profunda de los recursos de una región y su potencial uso. Mediante la caracterización, evaluación y planificación adecuadas, es posible aprovechar de manera sostenible estos recursos para beneficio local y global. Al llevar a cabo un diagnóstico riguroso, se puede tomar medidas efectivas para aprovechar de manera sostenible la biomasa y contribuir al equilibrio entre las necesidades humanas y la conservación del medio ambiente, a nivel local es esencial para una gestión sostenible y efectiva de los recursos, minimizando el impacto ambiental, promoviendo la economía circular, educando a la comunidad y garantizando el cumplimiento normativo, a su vez facilita la implementación de estrategias de gestión más sostenibles, económicas y ambientalmente responsables.

Introducción

La biomasa lignocelulósica es un tipo de biomasa que proviene de materiales vegetales ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos materiales incluyen principalmente residuos agrícolas (como paja de cereales y cáscaras de frutas) y de residuos forestales (como ramas y hojas etc.) (Cai et al., 2017). Estos residuos contienen lo son celulosa y la hemicelulosa que son polímeros de azúcar que se encuentran en las paredes

celulares de las plantas y son responsables de proporcionar estructura y rigidez a los tejidos vegetales. La lignina, por otro lado, es un compuesto que también forma parte de las paredes celulares y proporciona resistencia y durabilidad a la planta, la cual puede ser utilizada para diferentes usos como pueden ser biocombustibles (Wang et al., 2017). Por ello, la biomasa lignocelulósica se considera una fuente prometedora de energía renovable y productos químicos, ya que contiene carbono que se origina a partir de la captura de dióxido de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis (Orea Igarza et al., 2004).

El uso de esta biomasa puede ofrecer ventajas ambientales, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, también presenta desafíos técnicos y económicos, como la eficiencia de los procesos de conversión y la gestión sostenible de los recursos biomásicos (Orihuela et al., 2016).

Es importante destacar que la tecnología y la investigación en torno a la biomasa lignocelulósica siguen evolucionando, con el objetivo de mejorar la eficiencia de los procesos y ampliar su gama de aplicaciones en un contexto de energía y productos químicos más sostenibles.

Una de las primeras etapas para la cuantificación de la biomasa lignocelulósica es realizar un diagnóstico de la biomasa disponible de forma local, es un proceso fundamental para comprender y aprovechar de manera sostenible los recursos biológicos renovables presentes en una determinada

área geográfica. La biomasa, que incluye materia orgánica como plantas, residuos agrícolas y forestales, y otros materiales biológicos, posee un potencial significativo para ser utilizada como fuente de energía, materiales y productos químicos, lo que puede contribuir a la mitigación de la crisis energética y al manejo eficiente de los residuos (Fassnacht et al., 2014).

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. A continuación, se presenta una introducción a los pasos esenciales para llevar a cabo este proceso:

Descripción del proceso de diagnóstico

A continuación, se describe algunos de los pasos para realizar un diagnóstico de la biomasa disponible localmente:

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).

Identificación de la localidad: Define el área geográfica de interés para el diagnóstico, puede ser una región, una comunidad o una zona específica.

Recopilación de datos geográficos: Reúne información sobre la geografía, topografía, clima y suelos de la localidad, estos factores influyen en la distribución y el crecimiento de la biomasa.

Inventario de recursos biológicos: Identifica y clasifica los recursos biológicos disponibles en la localidad, esto incluye plantas, árboles, residuos agrícolas y forestales, subproductos de la industria alimentaria y otros materiales orgánicos (Ming-Ju Chen, Kreuter, 1996).

Identificación de fuentes de biomasa: Comienza por identificar y mapear las fuentes potenciales de biomasa en la región. Esto puede incluir desechos agrícolas, residuos forestales, subproductos de la industria agroalimentaria y biomasa urbana, entre otros. La colaboración con instituciones locales, agricultores, empresas y autoridades es esencial para recopilar información precisa.

Cuantificación de la biomasa: Mide la cantidad de biomasa presente en cada categoría identificada, esto puede realizarse mediante métodos de muestreo, análisis remotos y tecnologías de detección, una vez identificadas las fuentes, se procede a cuantificar la cantidad de biomasa disponible, esto puede implicar mediciones directas, estimaciones basadas en datos históricos y modelos matemáticos (Morales-Máximo et al., 2023). La precisión en la cuantificación es vital para evaluar el potencial energético y

la viabilidad económica. Para determinar los porcentajes de consumo, aprovechamiento de la materia prima y desecho de los residuos biomásicos específicamente maderables en talleres artesanales no industrializados de una comunidad, se realiza un diagnóstico, con visitas domiciliarias a por lo menos 50 talleres seleccionados de forma aleatoria una representación significativa del total de los talleres encontrados en un determinado lugar (López-Sosa et al., 2019).

Análisis de calidad de la biomasa: La calidad de la biomasa es un factor crítico en su uso eficiente, se debe analizar su contenido de humedad, densidad aparente, composición química y otros análisis relevantes, esto influye en los procesos de conversión energética y en la calidad de los productos derivados, entre los análisis más importantes que se debe de tomar en cuenta son el contenido de humedad y el poder calorífico superior.

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).

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

Dónde:

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: Seleccionar áreas representativas para realizar muestreos de biomasa. Esto podría involucrar la recolección y medición de muestras de plantas, árboles caídos y otros materiales orgánicos, la precisión de los resultados dependerá de la cantidad y ubicación adecuadas de los puntos de muestreo.

Análisis de datos: Procesar los datos recolectados utilizando herramientas estadísticas y software especializado, esto permitirá estimar la cantidad de biomasa presente en la región y comprender cómo se distribuye en diferentes zonas.

Interpretación y evaluación: Analizar los resultados en relación con los objetivos establecidos, al evaluar el potencial de la biomasa para usos específicos, como producción de bioenergía, materiales de construcción o fertilizantes orgánicos etc.

Consideraciones sociales y ambientales: Es fundamental tener en cuenta los aspectos sociales, culturales y ambientales en el diagnóstico, esto incluye evaluar el impacto del uso de la biomasa en la biodiversidad, el agua, el suelo y las comunidades locales.

Comunicación y acción: Compartir los resultados con partes interesadas relevantes, como gobiernos locales, organizaciones ambientales y comunidades locales. Utilizar la información para tomar decisiones informadas sobre el uso sostenible de la biomasa y desarrollar estrategias de gestión a largo plazo.

Factibilidad técnica y económica: Al evaluar la viabilidad técnica y económica de los posibles proyectos o iniciativas basadas en biomasa, se considera los costos de recolección, transporte, procesamiento y distribución.

Evaluación de factores ambientales: Considera los aspectos ambientales y sostenibles de la utilización de la biomasa. Evalúa los impactos ambientales, como las emisiones de gases de efecto invernadero y la degradación del suelo. También es importante considerar la disponibilidad a largo plazo y la capacidad de regeneración de las fuentes de biomasa.

Tecnologías de conversión disponibles: Investiga las tecnologías disponibles para la conversión de biomasa en energía o productos útiles, como la bioenergía, biogás, biocombustibles y productos químicos renovables. Comprende las ventajas y limitaciones de cada tecnología en función de la biomasa local y los objetivos específicos.

Evaluación económica y social: Analiza la viabilidad económica de utilizar la biomasa localmente. Considera los costos de recolección, transporte, conversión y distribución, así como los posibles beneficios

económicos y sociales para la comunidad local, como la creación de empleo y el desarrollo rural.

Planificación y toma de decisiones: Utiliza los datos recopilados y los análisis realizados para tomar decisiones informadas sobre la forma más adecuada de aprovechar la biomasa disponible, lo cual podría incluir la implementación de proyectos de energía renovable, la producción de productos biobasados o la mejora de prácticas de manejo de residuos.

Análisis de la sostenibilidad: Evalúa la sostenibilidad de la extracción de biomasa de las fuentes identificadas, se puede apoyar a través de metodologías como son: el análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis multicriterio.

Evaluación de la viabilidad técnica y económica: Determina si la biomasa identificada es técnicamente viable para los propósitos deseados y si su extracción y procesamiento son económicamente viables, lo cual implica analizar los costos involucrados en la recolección, transporte, almacenamiento y eventual procesamiento de la biomasa.

Investigación de mercados y aplicaciones: Investiga los mercados potenciales para la biomasa y las aplicaciones que podrían generar valor añadido, esto podría incluir la producción de bioenergía, la fabricación de productos químicos verdes o el uso en sistemas de gestión de residuos.

Identificación de barreras y oportunidades: Identifica las barreras potenciales que podrían limitar la utilización efectiva de la biomasa, como restricciones legales, falta de infraestructura o competencia con otros usos de la tierra. Al mismo tiempo, busca oportunidades para colaboraciones, inversiones y desarrollo de nuevos enfoques.

Desarrollo de estrategias de gestión: Con base en los resultados del diagnóstico, desarrolla estrategias de gestión de la biomasa, lo cual podría implicar la implementación de prácticas de manejo sostenible, la promoción de tecnologías eficientes o la identificación de áreas prioritarias para la conservación.

Planificación y políticas: Utiliza los resultados del diagnóstico para desarrollar estrategias de manejo y políticas que promuevan un uso sostenible de la biomasa local.

Educación y concienciación: Comunica los hallazgos del diagnóstico a la comunidad local, partes interesadas y tomadores de decisiones para fomentar la comprensión y el apoyo a las iniciativas relacionadas con la biomasa.

Generación de Informe: Documentar todos los hallazgos en un informe detallado. Este informe debe incluir los métodos utilizados, los resultados obtenidos, las recomendaciones y posibles medidas de manejo y conservación.

Conclusión.

Un diagnóstico de la biomasa disponible localmente es esencial para aprovechar de manera sostenible los recursos biológicos en una región. Al comprender las fuentes, la cantidad, la calidad y los factores ambientales, así como al considerar las tecnologías de conversión y los aspectos económicos y sociales, se puede desarrollar un enfoque integral que contribuya al crecimiento sostenible y la reducción del impacto ambiental. La planificación eficiente de recursos, que se debe al conocimiento de la cantidad y tipo de biomasa disponible en una región que permite una planificación más eficiente de los recursos, esto para llegar a trascender a una sostenibilidad ambiental, con la evaluación de la biomasa disponible, esto es crucial para garantizar prácticas sostenibles, conocer la cantidad de biomasa que se puede recolectar o utilizar sin comprometer los ecosistemas locales es esencial para evitar la sobreexplotación y el agotamiento de recursos naturales.

Ya que la reducción de costos con base al diagnóstico preciso de la biomasa local puede ayudar a reducir costos al planificar con antelación. Las empresas de forma local (talleres) pueden evitar gastos innecesarios al saber cuánta biomasa estará disponible y cuánto necesitan para sus operaciones y claro para su forma de aprovechamiento. Una de ellas puede ser la diversificación de fuentes de energía a través de biocombustibles sólidos de materiales lignocelulósicos, ya que, en el contexto de la energía renovable, la biomasa puede ser una fuente valiosa de energía; conocer la cantidad de biomasa disponible puede impulsar la adopción de tecnologías de

conversión de biomasa en energía, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Y a su vez fomenta el desarrollo económico local, en comunidades rurales al generar empleo en actividades relacionadas con su recolección, procesamiento y uso. Generando así una innovación e investigación en el aprovechamiento de la biomasa local para aprovecharla de manera efectiva, esto puede impulsar el desarrollo de tecnologías más eficientes de conversión de biomasa y la creación de productos de valor agregado. Por último, un diagnóstico detallado proporciona información objetiva que facilita la toma de decisiones en políticas gubernamentales, inversiones y estrategias empresariales relacionadas con la biomasa. En muchos casos, los gobiernos y las organizaciones se han comprometido con objetivos de reducción de emisiones y sostenibilidad, evaluar la biomasa local ayuda a alcanzar estos objetivos al proporcionar una fuente renovable y de bajo impacto ambiental. Conocer la biomasa disponible localmente puede ayudar a las comunidades a ser más resistentes ante desastres naturales o perturbaciones, ya que pueden confiar en recursos locales para satisfacer sus necesidades básicas.

En última instancia, un diagnóstico de la biomasa disponible localmente es esencial para tomar decisiones informadas y responsables en una variedad de sectores. Ayuda a equilibrar las necesidades humanas con la preservación del medio ambiente, impulsando el desarrollo sostenible local a largo plazo.

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>
- Fassnacht, F. E., Hartig, F., Latifi, H., Berger, C., Hernández, J., Corvalán, P., & Koch, B. (2014). Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. *Remote Sensing of Environment*, 154(1), 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.028>
- 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>
- López-Sosa, L. B., Núñez-González, J., Beltrán, A., Morales-Máximo, M., Morales-Sánchez, M., Serrano-Medrano, M., & García, C. A. (2019). A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205620>
- Ming-Ju Chen, Kreuter, J. Y.-T. K. (1996). Nanoparticles and microparticles for drug and vaccine delivery. *Journal of Anatomy*, 189 (Pt 3(Ii)), 503–505. <https://doi.org/10.1002/bit>
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quñones, 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>
- Morales-Máximo, M., López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Alcaraz-Vera, J. V., García, C. A., Álvarez-Jara, M., & Rutiaga-Quñones, J. G. (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. *Fire*, 6(8), 317.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fire6080317>
- Orea Igarza, U., Carballo Abreu, L. ., & Cordero Machado, E. (2004). Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte N° 2: Eucalyptus pellita F. Muell Revista. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 10(1), 51–55.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62910202>
- 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>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>

Capítulo 3: Evaluación prospectiva del potencial energético de la biomasa

Luis Bernardo López Sosa¹, Mario Morales-Máximo¹ & Carlos A. García²

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 propuesta general para la determinación del potencial energético disponible en poblaciones específicas, a partir de la identificación espacial y temporal, mediante diagnósticos cuantitativos, así como mediante 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, describiendo algunas recomendaciones para su gestión de manera local con pertinencia ambiental, factibilidad económica y viabilidad ambiental.

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

1. 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; Ma and Chen, 2019). 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. Por lo que la matriz de demanda energética a escala comunitaria no se concibe sin la biomasa: en forma de leña, residuos orgánicos o con productos de uso secundario como el cabrón vegetal.

La biomasa, en forma de leña, por ejemplo, es atractiva como combustible porque está disponible localmente, usualmente es de bajo costo y no

requiere de procesamiento para ser utilizada. Aún en condiciones de alta humedad la leña se consume porque es un combustible energéticamente asequible. Y domina como combustible en las viviendas rurales. Además, su presencia local incentiva la extracción por los habitantes de las localidades, ya sea para uso doméstico o como recurso intercambiable o de compraventa.

Así como en la leña, la bioenergía está presente en muchos otros recursos, y en particular en diversos residuos orgánicos que no tienen uso aparente o aún no se ha sistematizado. De forma general, la gestión de residuos orgánicos se aborda como un problema para su remoción, acopio, procesamiento y disposición final en subproductos. Y son pocas las aplicaciones energéticas que actualmente se tienen a gran escala, no obstante, son muchas las áreas de oportunidad. El sargazo (López-Sosa *et al.*, 2020), las cáscaras de frutas (Reddy *et al.*, 2011; Bahadur *et al.*, 2021; Diomande *et al.*, 2021) o residuos maderables (Morales-Máximo *et al.*, 2020) son ejemplos significativos de los recursos residuales que se generan y que pueden tener aplicaciones energéticas, y en específico ser transformados en biocombustibles sólidos.

Este capítulo aborda una propuesta general para identificar los recursos residuales biomásicos agrícolas, agroindustriales y del sector productivo comunitario. Que, a partir de su disposición espacial, temporal, y que en conjunción con la determinación del poder calorífico de estos residuos se posibilite estimar el potencial energético para determinada biomasa, en

cierto lugar y con acotada temporalidad. El alcance de este material estriba en ser una herramienta básica de consulta para introducirse al estudio de la bioenergía disponible localmente, y concretamente mostrar algunas directrices para la posible aplicación de estos residuos en la generación de biocombustibles sólidos.

2. 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 como se muestra a continuación (Smeets and Faaij, 2007; Offermann *et al.*, 2011; Ruppert, Kappas and Ibendorf, 2013; Arne Roth, 2016):

- **Potencial teórico:** es el límite superior de producción de bioenergía que está limitado por barreras físicas y biológicas fundamentales, incluida la biomasa de la tierra, los ríos, los mares, los océanos o, en otras palabras, toda la biomasa producida mediante reacción fotosintética.
- **Potencial geográfico:** la fracción del potencial teórico que está limitada por la superficie terrestre y excluye la biomasa marina.
- **Potencial técnico:** la fracción del potencial geográfico que está limitada por la demanda de tierra para la producción de alimentos, vivienda e infraestructura y la conservación de bosques. Además, se basa en el nivel de avance de la tecnología agrícola.
- **Potencial económico:** La fracción del potencial técnico que se puede producir a niveles económicamente rentables.
- **Potencial de implementación:** la fracción del potencial económico que se puede implementar dentro de un determinado período de tiempo, teniendo en cuenta las limitaciones institucionales y sociales y los incentivos políticos.

Una cadena energética de alto valor considera la articulación de estos potenciales, 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. Decantando en el contenido bioenergético desde su alta abundancia teórica hasta su uso específico y limitado; es decir, del total de energía disponible únicamente un porcentaje pequeño es aprovechado (Figura 1). Y aunque no siempre es posible la integración de todos los potenciales en una cadena productiva o

en usos específicos para plantas de aprovechamiento o generación de biocombustibles, si se pueden estudiar de manera independiente considerando datos primarios, relacionados con la abundancia de los recursos biomásicos, su contenido energético, así como su disposición espacial y temporal.

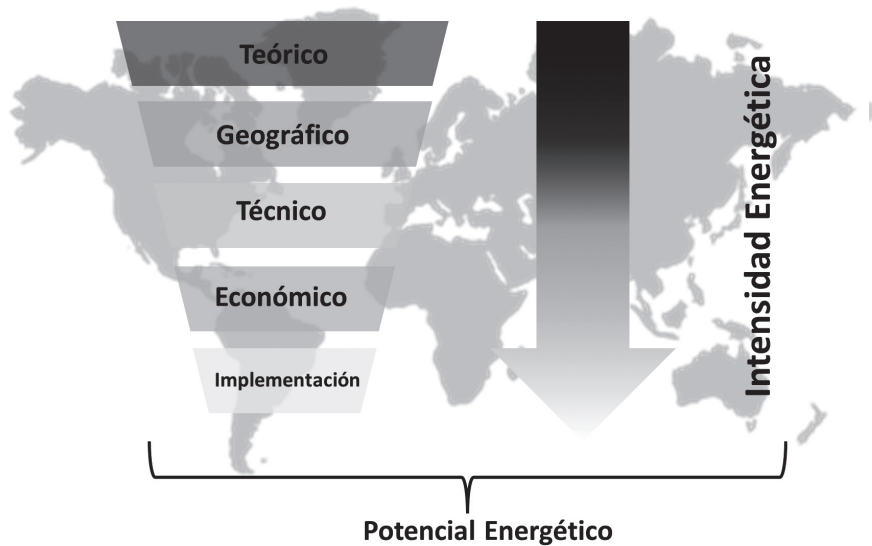


Figura 1. Segmentación del potencial energético.

En este capítulo se abordan algunas recomendaciones para el estudio del potencial energético disponible a partir de biomasa local. Y se asume algunas consideraciones:

- a) Las aplicaciones energéticas se estiman para biocombustibles del tipo sólido.

- b) Se establecen casos ideales del aprovechamiento considerando la biomasa energéticamente disponible libre de agentes tóxicos.
- c) Los recursos de biomasa principalmente se refieren a residuos generados de procesos y actividades agrícolas y agroindustriales.
- d) Los recursos biomásicos, son libe acceso, sin costos tabulados, sistematizados o catalogados por bienes o servicios.
- e) Se asume la biomasa como un recurso de emisiones neutrales.
- f) El objetivo es mostrar un panorama de gestión local de recursos biomásicos, apegados a procesos de remoción, procesamiento y disposición final.
- g) Se toma como clasificación principal de biocombustibles sólidos al material densificado en forma de pellets o briquetas.
- h) 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 el potencial técnico, económico ni de implementación, sólo analiza el potencial teórico y geográfico, y esta perspectiva se aborda desde tres etapas:

3. 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, como se ha referido en los apartados anteriores, pero principalmente 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 (Monroy, 2016; Morales-Máximo *et al.*, 2023)

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

dónde:

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]

Las unidades del potencial energético se adaptan a las magnitudes de la cantidad de biomasa residual disponible. 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.

Además, la disposición temporal de los recursos biomásicos también puede ser adaptada. Por ejemplo, algunos residuos agroindustriales se generan sólo durante algunos meses del año, de ahí que el potencial energético podrá estimarse de manera mensual durante el periodo de generación.

El contenido de humedad también 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). Por ejemplo, desde aquellos residuos que cuentan con valores superiores al 75% de humedad como frutícolas o de biomasa acuática como el sargazo o lirio (D'Agua, Pereira & Marinho, 2015; Salter *et al.*, 2020), hasta la biomasa forestal como el aserrín que se genera de la fabricación de muebles con contenidos cercanos al 20% (López-Sosa *et al.*, 2019; Morales-Máximo *et al.*, 2022), no es posible generalizar, puesto que el uso es diverso aun tratándose de aplicaciones energéticas en procesos de combustión. 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. Porque en la cotidianidad, esto ocurre, la humedad es variable. 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). Con la expresión anterior se infiere que cuando la humedad de los residuos de algún tipo de biomasa supera el 80%, el poder calorífico neto real será muy cercano a cero, es decir mayor humedad es sinónimo de menor energía potencialmente disponible de ser entregada en procesos o tareas de combustión; y es sumamente complicado tratándose de residuos con alto contenido de humedad procesarlos para la generación de biocombustibles. 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. Esta consideración asume que los valores reales del poder calorífico disponible en los residuos de biomasa siempre estarán por debajo de los valores registrados en condiciones de laboratorio (P_{ch}), donde usualmente las variables como la humedad están controladas.

4. 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. Que permite integrar una muestra representativa que será posible de analizar en casos futuros, recolectando un acervo significativo para el estudio de la caracterización, así como cuantificación del recurso o residuo. Además, el procesamiento suele eliminar el mayor contenido de humedad, así como posibles impurezas para disponer de la biomasa por una parte para lograr la caracterización y por otra parte para analizar la textura y posibilidad de uso como biocombustible sólido en pellets o briquetas.
- La asequibilidad de recolección. Existen casos donde los residuos son abundantes pero la recolección, procesamiento y traslado

encarecen el proceso, lo que limita la rentabilidad económica y, por ende, la factibilidad social y asequibilidad de los combustibles. Por lo que conocer el origen y la capacidad de gestión de los residuos o recursos biomásicos es necesaria y anticipa escenarios para definir la viabilidad para utilizarlos en cadenas productivas e incluso en potenciales energéticos totales como los comentados en apartados anteriores.

5. Disposición espacial y temporal

Adicional de la estimación de la masa y el contenido energético de los residuos o recursos biomásicos, es importante definir la disposición espacial y temporal de estos. Se deben conocer los puntos focales de generación de residuos, sus características, puntos de acceso, facilidad y capacidad de extracción, normatividad para el copio, procesamiento, traslado y gestión. Así como la identificación de la ubicación geográfica, la cercanía con vías terrestres, la afluencia y la definición de espacios libres de actividades y disponibles, cercanos a los puntos de mayor generación de residuos, para ser utilizados en alguna de las componentes del proceso productivo: acopio, procesamiento o disposición final como recurso, residuo, o biocombustible sólido.

La estimación de los residuos generados y la energía disponible depende también de una escala temporal. Acotada al periodo 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). Cuando existen perturbación en los sistemas de producción de recursos o residuos biomásicos en el último año, se deben utilizar datos de años anteriores o realizar un análisis en un año siguiente que sea ordinario; para evitar la distorsión o sesgo de la información que se analiza. La atipicidad de la evaluación de recursos energéticos renovables cada vez es más frecuente, por lo que en el caso de recursos como el solar o eólico se recurre a datos meteorológicos históricos de hasta 25 o 30 años para definir potenciales energéticos. En el caso de la bioenergía, no siempre es posible contar con datos históricos, por lo que se utilizan bases de datos de producción primaria para estimar recursos o residuos de biomasa, con lo que se puedan hacer proyecciones, es por lo que la identificación de “años modelo” es necesaria.

Por otro lado, para incorporar elementos del potencial geográfico, 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 como QGIS ® o ARQGIS ®, es posible elaborar mapas de distribución energética por zonas o puntos focales que se contrasten con las vías terrestres y la facilidad de acceso para el traslado de los residuos o recursos biomásicos.

La Figura 2, 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.

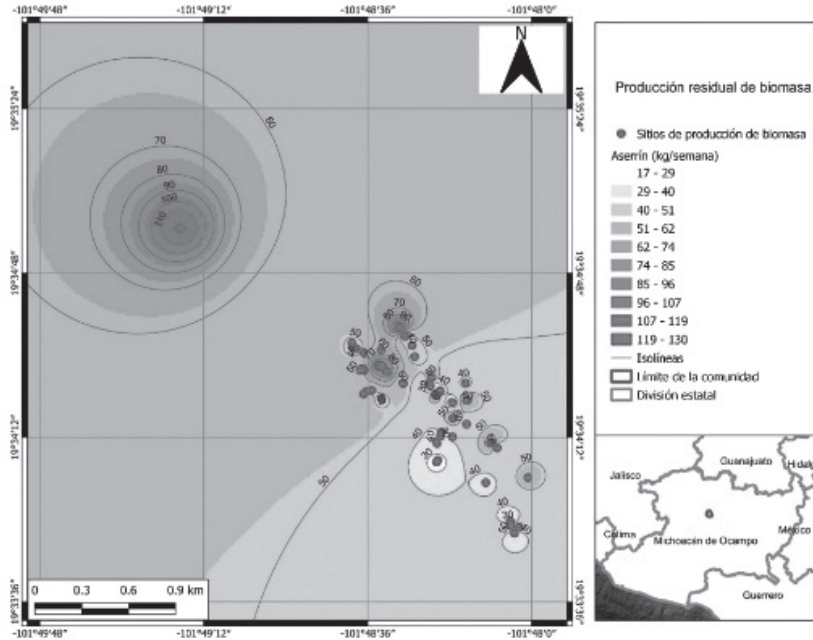


Figura 2. Mapeo energético de residuos maderables disponibles en 50 talleres artesanales de fabricación de muebles (Morales-Máximo *et al.*, 2023).

Se puede precisar que el análisis espacial en el caso del potencial teórico disponible permite:

- Identificar las áreas disponibles para centros de acopio. Estos serán aquellos que puedan almacenar semanalmente o en un periodo definido conforme a la capacidad de producción de recursos o residuos biomásicos, la materia recolectada de los principales puntos de mayor generación. La periferia de acopio deberá ser radial de forma que se puedan concentrar en un espacio concéntrico los recursos biomásicos,

en cuyo caso se identifiquen vías terrestres o marinas que conecten a todos los puntos de generación de residuos con el centro de acopio. Estos espacios deberán situarse distantes de las zonas urbanas, debido a que centros de gestión de residuos puede desprender sustancias poco convenientes para el sector residencial. Estos espacios deben ser de remisión, carga y almacenamiento de los recursos biomásicos.

- Centros o áreas de procesamiento. Estos espacios deberán ser concéntricos a los puntos de acopio lo más equidistantes posibles. Que cuenten con conectividad suficiente para concentrar la materia prima de los centros de acopio con los servicios básicos como combustibles necesarios para la operación, mantenimiento de máquinas y herramientas para el proceso de secado, triturado compactado y embalado. El lugar de ubicación podrá ser en la periferia de las zonas urbanas, donde se puedan contar con la operación del equipo necesario y sea de fácil acceso para el personal que trabaje en estos espacios. Los centros de procesamiento pueden funcionar con combustibles convencionales o renovables, y en el mejor de los casos con la misma energía que se pueda extraer de los recursos biomásicos que se procesen. Estos espacios son de valoración de los recursos porque pueden transformar la biomasa en combustibles alternativos del tipo sólido.
- Los centros o áreas de disposición final. Son los espacios con mayor conectividad entre las zonas urbanas, los centros de procesamiento y las vías principales de movilidad para hacer llegar los combustibles o

recursos bioenergético al usuario final. Estos centros o áreas contarán con la particularidad de ser establecimientos con bodega de almacenamiento de los combustibles sólidos que se generen o de los recursos biomásicos que se logren generar. Los centros de disposición final son centros de venta o dotación de los combustibles generados.

Esta clasificación, no es limitativa, representa una propuesta de gestión para recursos biomásicos, de forma sencilla que posibilite concebir la valoración y generación de combustibles alternativos. Un ejemplo de esta propuesta se aprecia en la Figura 3, donde se identifican a partir del análisis presentado en la Figura 2, las áreas con mayor generación de residuos, denominadas áreas críticas. Con base en el análisis de vialidades, zona urbana y generación de residuos se han identificado las zonas con posibilidad de implementación de centros de acopio, centros de procesamiento y centros de disposición final, esto con el supuesto de que los residuos maderables puedan ser transformados en briquetas (Morales-Máximo *et al.*, 2023)..

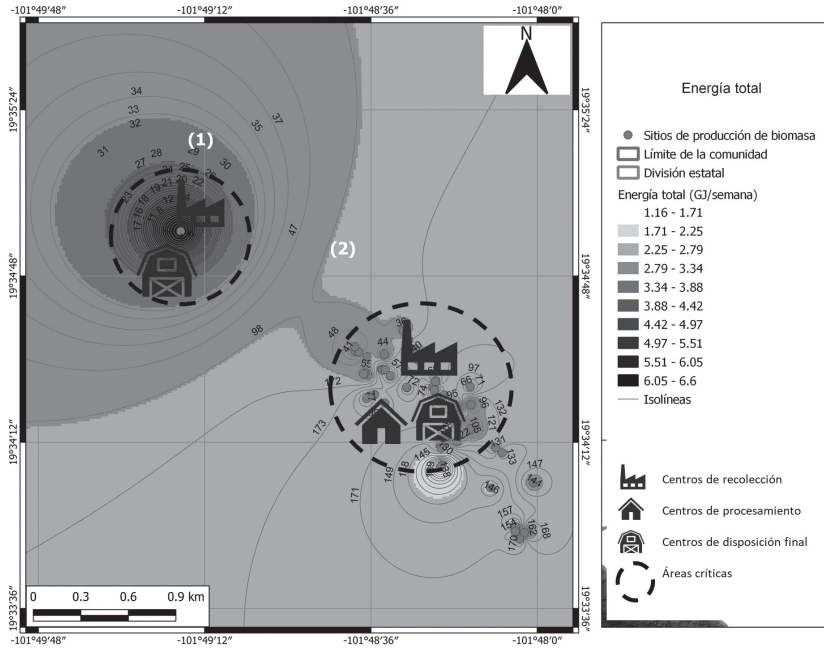


Figura 3. Mapeo energético desde el proceso de gestión de residuos maderables en San Francisco Pichátaro (Morales-Máximo *et al.*, 2023).

De esta forma, es posible lograr desde la estimación del potencial energético teórico y geográfico la identificación conceptual de cadenas productivas para la generación de biocombustibles sólidos, de forma preliminar, pero como insumos teóricos que permitan generar escenarios energéticos prospectivos.

6. Comentarios finales

Hasta ahora se han abordado aspectos metodológicos vinculados a la identificación de recursos biomásicos que, en suma, su caracterización y la identificación de la producción de forma espacial y temporalmente contribuyen a la determinación del potencial energético disponible. Permitiendo inferir posibles escenarios para definir cadenas productivas 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, por ejemplo:

- Ambientales. La gestión de residuos de biomasa puede ser ambientalmente viable si el proceso mantiene prácticas de bajo impacto. La cadena productiva requerirá de consumo de energía para el traslado a centros de acopio, el secado, procesamiento y transformación en pellets, briquetas o bio-carbón, tipos de biocombustibles sólidos. También el traslado del producto final para disposición al usuario es una componente que requiere de insumos energéticos para la movilidad. Así que es necesario acotar el transporte a través de vehículos de bajas emisiones como los automóviles híbridos o alternativas energéticamente sustentables. El procesamiento necesario para la

transformación de la materia biomásica puede generarse mediante tecnologías pasivas con funcionalidad mecánica o artesanal, o bien con equipos sistematizados, pero de baja potencia para que su consumo energético pueda proveerse mediante fuentes renovables de energías disponibles localmente: energía solar, hidrógeno, minihidráulica, eólica o también bioenergía. Además, se puede complementar el uso de estos combustibles alternativos a través de ecotecnologías, como estufas ahorradoras de leña (Masera, Díaz and Berrueta, 2005; Masera *et al.*, 2007; Berrueta, Edwards and Masera, 2008; Medina *et al.*, 2015; Bosque *et al.*, 2021).

- Económicos. Los recursos de biomasa son rentables inicialmente mientras no posean un valor añadido, pero una vez que se identifica su valoración y disemina su uso, éstos dejan de ser gratuitos y los precios en ocasiones se monopolizan o son bastante volátiles. Por lo que es necesaria la elaboración de una alternativa justa y asequible de compraventa de estos recursos, donde los productores y recolectores definan un precio adecuado que incentive la valoración de los residuos, la generación de empleos, pero manteniendo un esquema de precios accesibles al término de la cadena energéticamente productiva, es decir del producto final (biocombustible) comparado con los

combustibles de uso convencional. También, se requiere que todos los procesos de obtención de biocombustibles se lleven a cabo de manera local y con la mayor cantidad de recursos locales (materias primas/recursos energéticos/tecnologías de procesamiento), así como mano de obra local para incentivar esquemas de economía social y solidaria, de forma articulada a cadenas energéticamente productivas, así como evitar encarecer los precios finales de estos productos energéticos al depender de agentes externos. La producción local es un factor importante que garantiza la factibilidad económica de los biocombustibles, de otra forma la estrategia de gestión será poco viable o no atenderá las necesidades energéticas locales. La única forma de democratizar la bioenergía es fomentando la economía local vinculada a estos procesos de cadenas de productivas para la generación de biocombustibles sólidos de forma local.

- Sociales. Que logren la gestión del proyecto en tiempo y forma, técnicamente viable y socialmente aceptable. Se sugieren dos esquemas de operación: (a) la generación de emprendimientos locales que incentiven económicamente esta propuesta en su etapa inicial, definan explícitamente la cadena productiva desde la identificación de la materia prima hasta la determinación de su factibilidad técnico-

energética, y que se fomente el desarrollo de asociaciones o cooperativas energéticas que localmente puedan gestionar la cadena de valor de biocombustibles sólidos, buscando financiamiento y poner en operación las estrategias técnicas que logren la transformación de los recursos biomásicos en productos de uso final, y (b) la articulación con esquemas normativos y programas socio-empresariales que promuevan la aceleración de los emprendimientos mencionados, regulen el funcionamiento de posibles plantas de generación de biocombustibles, generen incentivos y permitan la sostenibilidad del proyecto. Estos procesos deben mantener en esencia algunas metodologías de investigación acción participativa, que posibiliten la toma de decisiones de manera conjunta en cuanto a los emprendimientos que resulten de validar la pertenencia de los recursos energéticos disponibles biomásicos.

Si bien, estas recomendaciones pueden ser generales y con limitaciones, representan 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 *Bioerosene Status and Prospects*. Martin Kal. SPRINGER, p. 128.
- Bahadur, D. *et al.* (2021) 'Lignocellulosic composition based thermal kinetic study of *Mangifera indica* Lam , *Artocarpus Heterophyllus* Lam and *Syzygium Jambolana* seeds', *Bioresource Technology*, 341, p. 125891. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125891>.
- Berrueta, V.M., Edwards, R.D. and Masera, O.R. (2008) 'Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico', *Renewable Energy*, 33(5), pp. 859–870. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>.
- Bosque, E.F. *et al.* (2021) 'Using design thinking to improve cook stoves development in Mexico', *Sustainability (Switzerland)*, 13(7), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073843>.
- D'Agua, J.A.D.C.B., Pereira, R.G. and Marinho, F.J.V. (2015) 'Preparación y caracterización física del biocombustible sólido del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*)', *Informacion Tecnologica*, 26(3), pp. 53–62. Available at: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300009>.
- Diomande, M. *et al.* (2021) 'Mango Peel and Almond Flour (*Mangifera indica* var *Amelie* , Kent , Keitt , Brooks) harvested , Processed in North of Cote d ' Ivoire : Biochemical Parameters and Mineral Content', *Asian Food Science Journal*, 20(6), pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.9734/AFSJ/2021/v20i630304>.

- 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. *et al.* (2019) ‘A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer’, *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). Available at: <https://doi.org/10.3390/su11205620>.
- López-Sosa, L.B. *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. 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.

- Ma, W. and Chen, G. (2019) 'Bioenergy and Environment', *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), p. 3843. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00868-7>.
- 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>.
- Masera, O. *et al.* (2007) 'Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico', *Energy for Sustainable Development*, 11(2), pp. 45–56. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60399-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60399-3).
- Masera, O.R., Díaz, R. and Berrueta, V. (2005) 'From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico', *Energy for Sustainable Development*, 9(1), pp. 25–36. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60480-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60480-9).
- Medina, P. *et al.* (2015) 'Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests', *Development Engineering*, 2(July 2015), pp. 20–28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>.
- 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'.
- Morales-Máximo, M. *et al.* (2020) 'Exploitation of Wood Waste of Pinus

- spp for Briquette Production : A Case Study in the Community of San Francisco Pich á taro , Michoac á n , Mexico’, *Applied Sciences*, 10(8), p. 2933. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>.
- Morales-Máximo, M. *et al.* (2022) ‘Briquettes from Pinus spp . Residues : Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector’, *Energies*, 15(9), p. 3419. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093419>.
- 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>.
- Reddy, L.V. *et al.* (2011) ‘Production of ethanol from mango (*Mangifera indica* L .) peel by *Saccharomyces cerevisiae* CFTRI101’, *African Journal of Biotechnology Vol.*, 10(20), pp. 4183–4189. Available at: <https://doi.org/10.5897/AJB10.2286>.
- 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>.
- Salter, M.A. *et al.* (2020) ‘Pelagic Sargassum as an emerging vector of high rate carbonate sediment import to tropical Atlantic coastlines’, 195(May). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103332>.
- 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 Reverté. Barcelona. Available at: <https://doi.org/9788429179125>.

Capítulo 4: Caracterización fisicoquímica en recursos biomásicos

Luis Bernardo López Sosa, Arturo Aguilera Mandujano & Mario Morales
Máximo

*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,

Resumen

Este capítulo aborda de manera descriptiva algunas técnicas de caracterización que pueden ser utilizadas para el análisis morfológico y fisicoquímico en recursos biomásicos. Se analizan 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, se describe su principio de operación, el funcionamiento del equipo que realiza el análisis 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.

1. Introducción

Una forma de analizar estructural y fisicoquímicamente recursos biomásicos es 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).

Estos análisis se pueden realizar después de un proceso de preparación de las muestras biomásicas de interés. Comenzando por el lavado para eliminar las impurezas 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 molienda 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 estructural de materiales. Es una prueba no destructiva y es la herramienta principal para la determinación de las fases de un material cristalino. La Difracción de Rayos X (DRX) provee información sobre estructuras, fases, orientaciones preferenciales del cristal, y parámetros estructurales como el tamaño de grano, cristalinidad, y defectos cristalinos (Bunaciu, Udriștioiu and Aboul-Enein, 2015).

La difracción de rayos X está basada en la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos y una muestra cristalina. Los rayos X son generados por un rayo de tubos catódicos, que son filtrados para producir radiación monocromática, para posteriormente ser concentrados y dirigidos hacia la muestra a analizar. La interacción entre los rayos incidentes y la muestra produce una interferencia constructiva cuando satisface la ley de Bragg (Ecuación 1) (Bunaciu, Udriștioiu and Aboul-Enein, 2015), que se me presenta a continuación:

$$n\lambda = 2d\sin\Theta \quad (1)$$

En donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia entre los planos de la red cristalina y Θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión. La ley de Bragg permite relacionar la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el espaciamiento de red de una muestra cristalina.

Los difractómetros de rayos X consisten en tres elementos principales: un tubo de rayos X, un porta-muestras y un detector de rayos X. Los rayos X son generados por un tubo de rayos catódicos, calentando un filamento, generalmente de tungsteno.

El equipo de difracción detecta los rayos X difractados a diferentes ángulos de 2Θ y los procesa para obtener la intensidad de los picos de difracción de la muestra correspondiente a cada ángulo 2Θ (Askeland, D. R., & Phulé, 2004). Para identificar los compuestos presentes en la muestra a partir de los picos de difracción, es necesario comparar el patrón obtenido con patrones estándar de referencia.

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). En este trabajo, la técnica de DRX tuvo la finalidad de comprobar que efectivamente se obtuvo óxido de grafeno con el método Hummers y que

el proceso posterior de reducción al óxido de grafeno permitió obtener óxido de grafeno reducido, también llamado simplemente grafeno. Puede notarse una diferencia en los picos de difracción de cada una de las muestras y un aspecto clave a tomar en cuenta en este caso en particular, es la distancia interplanar.

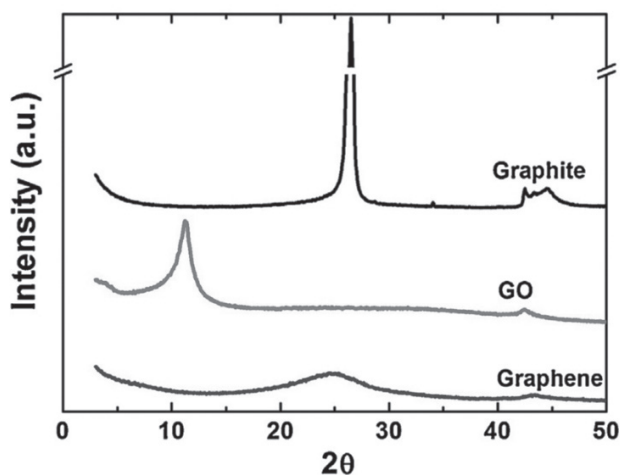


Figura 1. Comparación de los patrones de DRX de grafito, óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido (grafeno) (Johra, Lee and Jung, 2014).

El proceso de identificación de cada uno de los picos de difracción es conocido como indexación y permite conocer los compuestos presentes en el material analizado, así como las características estructurales cristalinas, los planos cristalinos y el porcentaje de cristalinidad del material. Esta técnica aplicada a los recursos biomásicos, es útil para conocer por ejemplo el contenido de compuestos poliméricos 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). Un amplio rango de materiales con enlaces covalentes absorbe radiación electromagnética en la región del infrarrojo, que es de menor energía y de mayor longitud de onda comparada con la región visible y ultravioleta. Cuando la radiación infrarroja interactúa con un enlace covalente de un material con un dipolo eléctrico, la energía molecular absorbida y el enlace presentan una oscilación. Esta oscilación produce una vibración molecular, que es característica de cada enlace y depende de los átomos en el enlace, el número de enlaces y la orientación de estos.

Las vibraciones moleculares pueden ser identificadas para conocer los enlaces presentes en la muestra. Existen dos modos principales de vibración: de tensión y de flexión. Sin embargo, también ocurren modos complejos de vibración, derivados de los modos principales. Las

vibraciones de tensión pueden ser simétricas o asimétricas, mientras que las vibraciones de flexión pueden ser de tijera, balanceo, cabeceo y torsión.

El equipo de FTIR típico consiste en una fuente de luz infrarroja, 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, que es comúnmente designado como porcentaje de transmitancia contra número de onda (cm^{-1}). Los números de onda se encuentran generalmente en el rango de $4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$. A partir del espectro de absorción es posible identificar los grupos funcionales presentes en una muestra.

Mediante FTIR se pueden identificar grupos funcionales 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, Shameli and Abd Hamid, 2013). La muestra (a) se preparó como una solución precursora a partir de isopropóxido de titanio (IV). La muestra (b) sintetizada a partir de la solución precursora y añadiendo una solución de clara de huevo para prevenir la aglomeración de las nanopartículas de titania. El rango de los espectros se encuentra entre $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. Los autores mencionan que la muestra (b) (curva b) presenta picos en 485 cm^{-1} y 732 cm^{-1} correspondientes al enlace O–Ti–O de la fase cristalina de anatasa. Las bandas centradas en 1621 cm^{-1} y 3354 cm^{-1} son características de agua adsorbida en la superficie y grupos hidroxilo. Por otro lado, la muestra (a) (curva a) presenta picos en 479 cm^{-1} y 652 cm^{-1} correspondientes a la fase de anatasa, mientras que los picos centrados en 1627 cm^{-1} y 3388 cm^{-1} son características de flexión $\delta\text{-H}_2\text{O}$ y vibración de grupos de hidroxilo. En dicho trabajo, la espectroscopia FTIR fue una de las técnicas de caracterización utilizadas para comparar el efecto producido por la solución de clara de huevo en la estructura de las nanopartículas de titania.

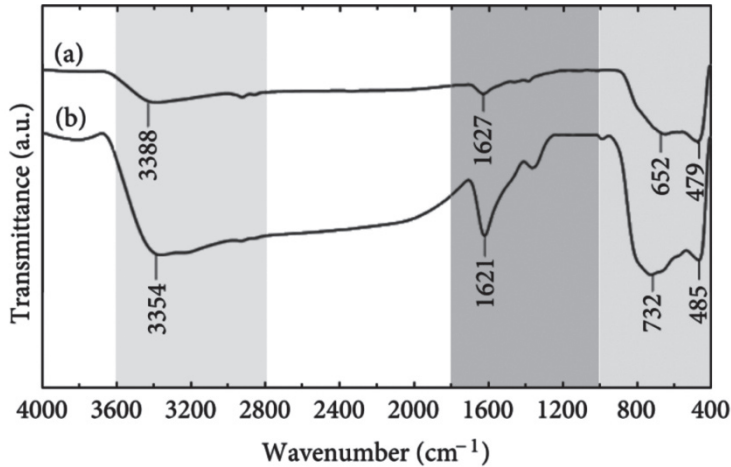


Figura 2. Espectros de FTIR de nanopartículas de titania [5].

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). Esto permite la caracterización de microestructuras a diferentes escalas, desde la microescala hasta la nano escala (Inkson, 2016). 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.

Por otra parte, la microscopía electrónica también presenta algunas desventajas, como es la necesidad de tener un cierto nivel de vacío, debido a la fuerte interactividad de los electrones con las moléculas de aire. Otra desventaja significativa de esta técnica de caracterización es la alta energía de los electrones que, al ser transferida hacia la muestra, puede producir cambios no deseados en el material que se está observando, por lo que resulta muy importante considerar tanto las propiedades del material de la muestra, como las condiciones de operación del equipo de microscopía electrónica.

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).

Los factores más importantes para la interacción entre el haz de electrones y la muestra son el ángulo de incidencia del haz, el número atómico del material analizado y el voltaje de aceleración del equipo. Si se incrementa

el voltaje de aceleración (energía del electrón), el volumen de interacción y la dispersión también se incrementa, mientras que, si el número atómico del elemento del material es alto, el volumen de interacción y la dispersión serán bajas.

Los electrones emitidos debido a la interacción entre el haz de electrones y la muestra pueden ser secundarios o retrodispersados. Los electrones secundarios son los que escapan desde la superficie de la muestra, cuando una parte de la energía de los electrones primarios (provenientes del haz de electrones) es transferida a los electrones de la muestra. Estos electrones son utilizados para generar imágenes de la topografía y la morfología de la muestra (A. Alyamani and O. M. Lemine, 2012).

Por otro lado, los electrones retrodispersados son los electrones primarios que son reflejados desde la superficie de los átomos. La energía de estos electrones varía de acuerdo con la densidad del átomo desde el cual fueron reflejados. En consecuencia, el mecanismo de contraste más importante con los electrones retrodispersados es el número atómico (Reimer, 1998). Estos electrones se usan para visualizar la variación en la composición superficial de la muestra, ya que se observan zonas más brillantes donde se encuentran átomos con mayor número atómico.

Como se mencionó anteriormente, además de los electrones, la muestra también emite rayos X cuando interactúa con el haz de electrones. Estos rayos X son abundantes y emitidos en todas direcciones. Un análisis de energía dispersa de rayos X permite detectar el número de rayos X con una

determinada energía en una zona particular de la muestra, lo que forma un espectro de energía dispersa, que exhibe los diferentes elementos presentes en la zona analizada. A partir de los rayos X emitidos por la muestra y empleando la espectroscopía de rayos X, es posible, además, realizar un análisis cuantitativo y un mapeo elemental de áreas específicas de la muestra para conocer la distribución elemental de la superficie observada (Inkson, 2016).

La Figura 3 muestra una imagen obtenida con el MEB de nanopartículas de ZnO dopadas con Mn que fueron preparadas con el método de solución [10]. Las nanopartículas tienen una estructura típica de wurtzita hexagonal. Los diámetros de las partículas se encuentran en un rango de entre 0.5 y 1 μm .

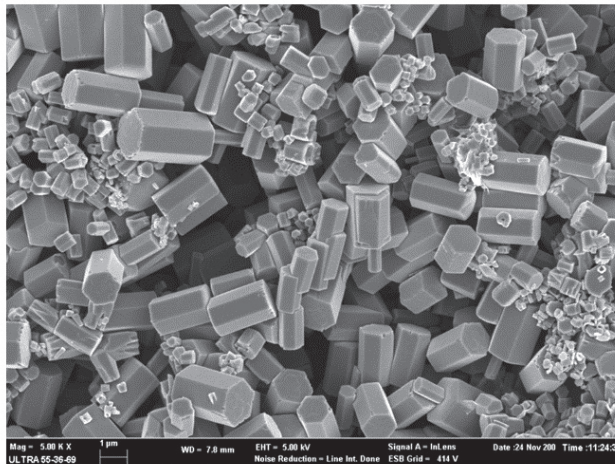


Figura 3. Imágenes de MEB de nanopartículas de ZnO dopadas con Mn [10]

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 4. 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* Schltdl (Copalillo), que resulta de la fabricación de máscaras de madera en la comunidad de Tócuaro, Michoacán, México.

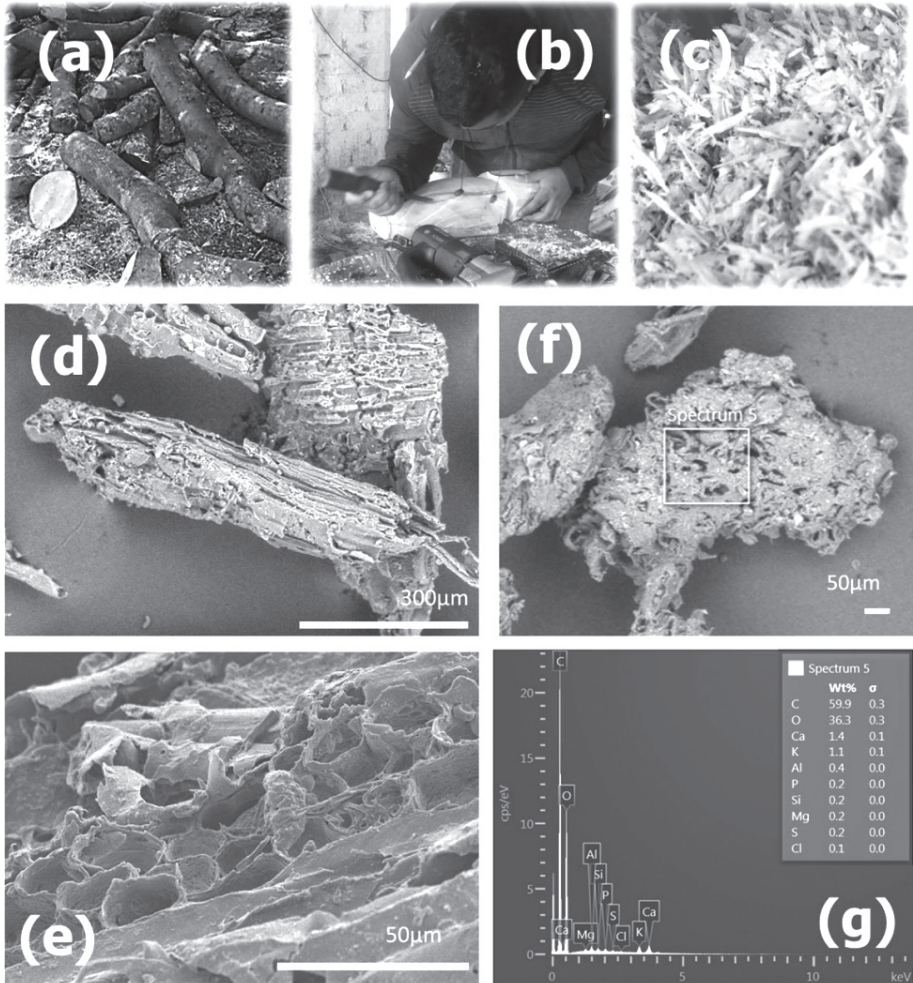


Figura 4. Proceso de generación de residuos de *Bursera cuneata* Schltdl: (a) corte (b) fabricación de artesanías (c) acumulación de residuos. SEM: (d), (e) morfología (f) (g) análisis químico semicuantitativo (SEM-EDS) (Catillo-Tera *et al.*, 2023).

Espectroscopia Raman

La espectroscopia 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), y presenta algunas ventajas notables con respecto a otras técnicas de caracterización como, por ejemplo, el hecho de que la calidad de la señal recolectada por el equipo no se ve afectada considerablemente por la presencia de agua (Skinner, 2008).

Es una técnica que se especializa en la medición de la luz dispersa inelástica desde la muestra cuando el fotón de la luz incidente interactúa con la molécula y produce un fotón disperso (Das and Agrawal, 2011). La interacción entre un fotón incidente y una estructura cristalina o molécula produce la dispersión elástica o inelástica del fotón. Cuando la energía del fotón dispersado es igual a la del fotón incidente, recibe el nombre de dispersión elástica o *Rayleigh* y es el tipo de dispersión predominante. Por otra parte, cuando la energía del fotón dispersado no es igual a la del fotón incidente, se le llama dispersión inelástica o *efecto Raman*. Este proceso inelástico deja a la molécula en un estado vibracional, y en el caso de las redes cristalinas, se crea un cuanto de vibración, conocido como fonón (Jones *et al.*, 2019).

La espectroscopia Raman se basa en la medición del cambio en la energía del fotón disperso de manera inelástica. Las variaciones de frecuencia provocadas por el efecto Raman dependen de la estructura química de las moléculas responsables de la dispersión. Las vibraciones moleculares

proveen información sobre la estructura, simetría, entorno eléctrico y enlaces de las moléculas; por lo que es posible realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de los compuestos presentes en la muestra (Das and Agrawal, 2011).

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, 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).

Esta técnica de caracterización tiene un amplio rango de aplicaciones en diferentes campos de la ciencia. En la ciencia forense, se utiliza para analizar fibras, materiales orgánicos, explosivos, pinturas, entre otros materiales (Das and Agrawal, 2011). En la evaluación de la calidad de alimentos, provee información estructural acerca del cambio en las proteínas, agua y lípidos que ocurre durante su deterioración. La espectroscopia Raman puede ser, además, una técnica de diagnóstico de materiales biomédicos, ya que puede emplearse para analizar sangre, piel, piedras renales, tumores, etc. En el caso de los recursos biomásicos también sirve para identificar compuestos poliméricos y materiales extraíbles como fenoles y algunos carbohidratos.

En cuanto a la caracterización de materiales, la espectroscopía Raman se usa frecuentemente para analizar los alótropos de carbono, y materiales orgánicos. Y es útil para complementar técnicas de caracterización como

DRX y FTIR, que un análisis de MEB permiten identificar de mejor manera las propiedades morfológicas y fisicoquímicas de materiales biomásicos.

En la Figura 5 (a) se muestran ejemplos de espectros Raman de un trabajo en donde se sintetizaron muestras de grafeno con diferentes números de capas (Ferrari *et al.*, 2006). Las muestras de grafeno se produjeron mediante clivaje micromecánico y se analizaron muestras del grafito precursor y de grafeno mediante la técnica de espectroscopia Raman.

Los espectros Raman fueron obtenidos con una longitud de onda del láser de excitación de 514 nm. Los dos picos más prominentes tanto en el espectro del grafito como en el del grafeno son el pico G a 1580 cm^{-1} y la banda D' (2D) a 2700 cm^{-1} . Como se puede observar en los espectros del grafeno y del grafito, existe una variación significativa en la intensidad tanto de la banda G como de la 2D, además de que la banda 2D también presenta un cambio en su forma. La banda D, que es la banda relacionada con el desorden, no se observa en el espectro del grafeno, lo que prueba que no existe una cantidad significativa de defectos en la muestra.

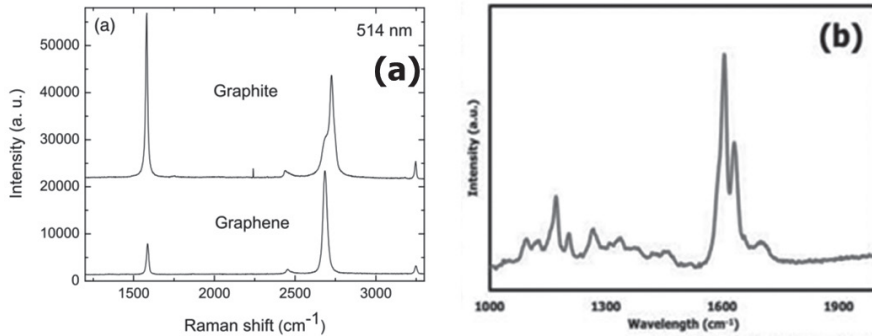


Figura 5. (a) Espectros Raman de grafito y grafeno (Ferrari *et al.*, 2006)
 (b) Espectro Raman de residuos de *Zea mays* (Morales-Máximo *et al.*, 2022).

Otro ejemplo se muestra en la figura 5 (b), donde se aprecia un espectro Raman de residuos de *Zea mays* (Rastrojo), producto de una investigación para identificar el potencial energético de ese recurso. En dicho espectro se puede observar bandas en las regiones entre 1000 y 1300 cm^{-1} y 1500 y 1700 cm^{-1} , que corresponden a glucosa y celulosa, compuestos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno: CH_2 , COH, CCH, OH y CH (Morales-Máximo *et al.*, 2022). En esta investigación los resultados son consistentes con análisis FTIR y MEB, con lo que se corrobora presencia de estos carbohidratos y compuestos poliméricos.

Referencias

- A. Alyamani and O. M. Lemine (2012) 'FE-SEM Characterization of Some Nanomaterial', in *Scanning Electron Microscopy*. Intechopen. Available at: <https://doi.org/10.5772/34361>.

- 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/ozad067.036>.
- Das, R.S. and Agrawal, Y.K. (2011) ‘Raman spectroscopy: Recent advancements, techniques and applications’, *Vibrational Spectroscopy*, 57(2), pp. 163–176. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2011.08.003>.
- 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>.
- Ferrari, A.C. *et al.* (2006) ‘Raman spectrum of graphene and graphene layers’, *Physical Review Letters*, 97(18), pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>.
- 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>.
- Jones, R.R. *et al.* (2019) ‘Raman Techniques: Fundamentals and Frontiers’, *Nanoscale Research Letters*, 14(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3039-2>.
- Khallaf, A.E.M. and El-Sebaii, 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>.
- Reimer, L. (1998) *Scanning Electron Microscopy*. 2nd edn. Springer.
- 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>.
- Skinner, B.M.A. and J.L. (2008) ‘IR and Raman spectra of liquid water: Theory and interpretation’, *Journal of Chemical Physics*, 128(22). Available at: <https://doi.org/10.1063/1.2925258>.
- 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: Caracterización proximal de los biocombustibles sólidos

Luis Fernando Pintor-Ibarra*, Fernando Daniel Méndez-Zetina,
José Guadalupe Rutiaga-Quñones, 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: luis.pintor@umich.mx*

Resumen

El análisis proximal de los biocombustibles sólidos como madera, carbón vegetal, pellets, 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, también se podrán encontrar parámetros técnicos importantes para su comercialización en el mercado internacional. Además, se discuten aspectos importantes en la industria de los biocombustibles

basados en investigaciones reportadas en la literatura. Finalmente, se podrán consultar resultados seleccionados de análisis proximales de biomasas mexicanas. 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, carbono fijo, material volátil, materiales lignocelulósicos, pellets.

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-Martí, 2018). La biomasa se puede transformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles (leña, carbón vegetal, pellets, briquetas, bioetanol, biodiesel, biogás, entre 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-García *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-Flores y Rutiaga-Quiñones, 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). En contraste, actualmente algunas comunidades rurales de los países en desarrollo utilizan biocombustibles sólidos, como la leña como fuente de energía sin que exista ningún estudio técnico que evalúe sus características proximales y energéticas (Ruiz-Aquino et al., 2022). En este contexto, las principales normas internacionales para su caracterización son: UNE (Asociación Española de Normalización) y ASTM (American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés). Estos estándares permiten evaluar la calidad de los biocombustibles sólidos: madera, astillas, cortezas, pellets, briquetas y carbón vegetal, mediante el análisis proximal: porcentaje de humedad (UNE-EN ISO 18134-1, 2015; UNE EN 14774-3, 2010; ASTM E871-82, 2006), material volátil (UNE-EN ISO 18123, 2015; ASTM E872-82, 2013; ASTM E897-88, 2004), cenizas (UNE-EN ISO 18122, 2015; ASTM D1102-84, 2007; ASTM E830-87, 2004), y carbono fijo (NBN M11-001, 1984; DIN 1749, 1989; EN 1860-2, 2005) y por

diferencia de algunos datos obtenidos previamente del análisis proximal de acuerdo a García et al. (2012).

Humedad

La determinación del contenido de agua (CH) 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 agua que se encuentra en la biomasa saturando los poros y capilares se denomina agua libre, mientras que el agua asociada a los componentes de la pared celular mediante adsorción o absorción se denomina agua estructural o también se denomina agua higroscópica (asociada a los componentes de la pared celular mediante fuerzas de naturaleza química como enlaces de hidrógeno). Se puede decir que el agua total presente en la biomasa es igual a la sumatoria del agua libre más el agua higroscópica.

El contenido de humedad de la biomasa para elaborar biocombustibles sólidos es un factor importante (Oberberger y Thek, 2010) e influye en las propiedades de estos de estos biocombustibles (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 biomásas 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:

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

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

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

El agua contenida en la biomasa influye directamente en magnitud de parámetros importantes de los biocombustibles, como la masa, densidad, y principalmente en el poder calorífico. También tiene influencia en procesos como: la obtención de biodiésel, etanol, pirólisis, gasificación y fermentación de los distintos tipos de biomásas. En la Tabla 1 se pueden

consultar algunos aspectos importantes de la humedad en los biocombustibles.

Tabla 1. Parámetros técnicos de CH de acuerdo a normas para biocombustibles sólidos y efectos en la industria de los biocombustibles.

Ensayo	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los biocombustibles
Humedad	Pellets <10% ¹	Alto CH de la biomasa aumenta el peso, por consiguiente, aumenta el costo de transporte y genera un gasto energético durante el astillado de madera e influye en la calidad de las astillas (Pintor-Ibarra et al., 2018).
	Briquetas ≤18% ²	Biomاسas con altos porcentajes de humedad requieren de operaciones de secado, lo que aumenta los costos y tiempo de secado para su uso como biocombustible (Lehtikangas, 2001; Morales-Máximo et al., 2022).
	Carbón vegetal <7% ³	El alto CH en los biocombustibles sólidos disminuye el poder calorífico, la eficiencia en los procesos de combustión, afectando el balance de energía, y el proceso de evaporación durante la conversión térmica (Miranda et al., 2009; Obernberger y Thek 2010; García et al., 2012; Correa-Méndez et al., 2014; Sukarni et al., 2019).
	Astillas ≤ 30% ²	Alto CH afecta la conversión termoquímica y gasificación (García et al., 2012).
	Aserrín, virutas, corteza ≤ 15 % ²	Alto CH en la biomasa la vuelve resbaladiza y no se puede compactar fácilmente (Lehtikangas, 2001).
	Pellets ⁴ Categorías: A1 < 10 % A2 < 10 % A3 < 10 %	Bajo CH dificulta la compresión, moldeado, y calidad de los pellets (Ríos-Saucedo et al., 2021).
	Astilla ⁵ Categorías: A1 < 25 A2 35 % A3 > 35 %	

		<p>Si el CH es demasiado bajo, la fricción entre el aserrín y el equipo de procesamiento mecánico será alta, lo que aumentará el consumo de energía (Relova et al., 2009).</p> <p>El CH es uno de los parámetros más importantes para la durabilidad mecánica de los pellets (Whittaker y Shield, 2017). El agua es el principal producto condensable de la torrefacción, que se libera durante el secado cuando la humedad se evapora (Bustamante et al., 2016).</p> <p>CH superiores al 40% en biomásas se recomienda emplear métodos biológicos como la fermentación o digestión anaeróbica y biomásas con menor CH se recomienda aplicar procesos termoquímicos, por ejemplo: pirólisis, gasificación y combustión (Gassner y Maréchal, 2009).</p> <p>La humedad de la biomasa afecta la concentración de los reactivos químicos en conjunto con otras variables como la temperatura y el tiempo de reacción, en los procesos de transformación de los materiales lignocelulósicos (Pintor-Ibarra et al., 2018).</p> <p>La dosificación de los reactivos químicos en los procesos de transformación química de la madera y los rendimientos siempre se realizan en base a peso anhidro de la biomasa, lo que hace indispensable el cálculo del agua que posee las distintas materias primas lignocelulósicas (Pintor-Ibarra et al., 2018).</p>
<p>¹Obernberger y Thek (2010), ²ÖNORM 7135 (2000), ³NBN-M11-001 (1984), ⁴ISO 17225-2 (2014), ⁵ISO 17225-4 (2014)</p>		

Material volátil

La materia volátil (MV) 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 combustión, se libera cuando la biomasa se calienta de 200°C a 500°C (Velázquez-Martí, 2018; Martínez-Gómez et al., 2022). 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; Ruiz-Aquino et al., 2022). 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 el procedimiento 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:

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

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

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

La materia volátil es el componente más inflamable de la biomasa (Shen et al., 2009). Por otro lado, los niveles de materia volátil son inversamente proporcional al contenido de carbono fijo (Pereira et al., 2012), y la cantidad de materia volátil influye en el comportamiento de los biocombustibles sólidos durante la combustión (Tauro et al., 2018). En la Tabla 2 se integran aspectos técnicos de la materia volátil de biocombustibles y su influencia en los procesos industriales. Con respecto a las zonas de la estructura de la madera la corteza presenta mayores cantidades de materia volátil debido a las cantidades significativas de lignina y extraíbles (Lehtikangas, 2001).

Tabla 2. Parámetros técnicos de MV de acuerdo con normas para biocombustibles sólidos y efectos en la industria de los biocombustibles.

Ensayo	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los biocombustibles
Materia volátil	<p>Astilla, aserrín de madera > 65%¹</p> <p>Pélets de madera > 60 %¹</p> <p>Carbón vegetal <16 %^{2,3}</p>	<p>Alto contenido de MV en los biocombustibles sólidos facilitan su ignición e incluso a temperaturas relativamente bajas (Vamvuka et al. 2011; García et al., 2012; Mitchual et al. 2014; García-Maraver et al., 2015), en contraste, altos niveles de MV producen una combustión rápida, que resulta en una desventaja para los biocombustibles sólidos (Holt et al., 2006).</p> <p>Altos contenidos de MV favorecen la conversión térmica de la biomasa, que lo convierte en un material apropiado para la utilización de energía (Van der Loo y Koppejan, 2002; Holt et al., 2006; Carrillo-Parra et al., 2018).</p> <p>La alta proporción de MV favorece a los pellets y a su poder calorífico (Vamvuka et al. 2011; García-Maraver et al., 2015; Carrillo-Parra et al., 2018).</p> <p>Altos contenidos de MV durante la combustión de leña, carbón y otros biocombustibles sólidos causan la liberación de alquitranes y emisión de humos (Koppejan y Van der Loo, 2012; Bustamante-García et al., 2014; Ngangyo et al., 2014), provocando mala calidad del aire y contribuyen a la generación de contaminantes que pueden tener repercusiones negativas en los ecosistemas e incluso en la salud humana (Querol, 2008).</p> <p>Alto porcentaje de MV y bajo contenido de CF reducen la friabilidad y fragilidad; también aumentan la resistencia a la compresión, adhesión y cohesión de los pellets (Demirbaş, 2003; Carrillo-Parra et al., 2018).</p> <p>Alto porcentaje de volátiles favorecen los rendimientos de la conversión de la biomasa a biodiésel por pirólisis rápida (López-Sosa et al., 2020).</p>
¹ Sánchez (2012), ² NBN-M11-001 (1984), ³ DIN 51749 (1989)		

Cenizas

El contenido de cenizas es un importante parámetro para considerar en la selección de un combustible como biomasa, 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-Martí, 2018). Otras normas de ensayo la usan para la determinación de la composición química de la ceniza. 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), y la variación en los constituyentes químicos y sus cantidades dependen de adaptaciones fisiológicas, a las condiciones de potencial hídrico del suelo y de las diferentes especies de plantas (Bárceñas-Pazos et al., 2008), o a la zona de la madera, por ejemplo, las cortezas se caracterizan por un alto contenido de cenizas (Feng et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017). La variación del porcentaje de cenizas en las distintas biomásas es compleja; en biocombustibles densificados se reportan intervalos de 0.26 a 6.5%

(Ramírez-Ramírez et al., 2021; Ramírez-Ramírez et al., 2022), carbón vegetal 1.13 a 4.83% (Ruiz-Aquino et al., 2019), biomásas acuáticas 11.93 a 20.1 (Sukarni et al., 2019; Alvarado-Flores et al., 2022), residuos agroindustriales 3.38 a 17% (Felfli et al., 2011; Ngangyo et al., 2022) y maderas de diversas especies 0.17 a 4.51 % (Rutiaga Quiñones et al., 2020).

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:

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

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

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

La concentración de sustancias inorgánicas en la biomasa es un factor importante para un biocombustible sólido; se le considera un parámetro que ayuda a determinar rápidamente la calidad del biocombustible y a determinar la cantidad de residuos que se pueden generar durante la

combustión de biomasa (Oberberger y Thek, 2010; Lu et al., 2014). En la Tabla 3 se menciona la influencia de las cenizas en los biocombustibles.

Tabla 3. Parámetros técnicos de las cenizas de acuerdo a normas para biocombustibles sólidos y efectos en la industria de los biocombustibles.

Ensayo	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los biocombustibles
Cenizas	Pellets $\leq 1.5\%$ ¹	Altos contenidos de cenizas pueden causar problemas durante el proceso de combustión en los equipos como: corrosión, erosión, abrasión, formación de escorias, incrustaciones, sinterización, produce emisiones, obstruye el flujo de gases de combustión y puede disminuir la eficiencia de los equipos (Lehtikangas, 2001; Werkelin et al., 2011; Nunes et al., 2016; Carrillo-Parra et al., 2018; Pradhan et al., 2018; Massuque et al., 2020; Rodríguez et al., 2021). Alto contenido de cenizas en los biocombustibles sólidos puede afectar a los usuarios al aumentar los procesos de la limpieza de los equipos de combustión (Oberberger y Thek, 2010). Elevado contenido de cenizas aumenta los costos de mantenimiento en los equipos de combustión (Grover y Mishra, 1996). El azufre y cloro, contenidos en las cenizas, pueden provocar la formación de escoria, suciedad y problemas de corrosión (Ahmaruzzaman, 2010). Los compuestos inorgánicos absorben calor de la misma manera que la humedad, con ello disminuye la eficiencia de la torrefacción y estimula la formación de residuos carbonosos (Bridgeman et al., 2008). Las cenizas afectan los equipos de molienda y peletización (Carrillo-Parra et al., 2018).
	Pellets ²	
	Categoría	
	A1 $< 0.7\%$	
	A2 $< 1.5\%$	
	B $< 3.0\%$	
	Astilla ³	
	A1 $< 0.7\%$	
A2 $< 1.5\%$		
B $< 3.0\%$		
Pellets $< 0.70\%$ ⁴		
Briquetas $< 0.50\%$ ⁵		
Carbón vegetal $< 6\%$ ⁶		
Carbón vegetal $< 8\%$ ⁷		
Carbón vegetal en el mercado de Japón $< 4\%$ ⁸		

		<p>Las cenizas reducen la calidad de los pellets, y aumentan la emisión de partículas al medio ambiente (Tumuluru et al., 2010)</p> <p>De acuerdo a diversos autores el aumento del contenido de cenizas tiene un efecto negativo sobre el poder calorífico es decir a mayor porcentaje de cenizas el poder calorífico disminuye (Martínez-Pérez et al., 2015; Bustamante-García et al., 2016; Ngangyo-Heya et al., 2016; Pintor-Ibarra et al., 2017; Pradhan et al., 2018; Ruiz-Aquino et al., 2019)</p>
<p>¹EN14961-2 (2013), ²ISO 17225-2 (2014), ³ISO 17225-4 (2014) ⁴Obernberger y Thek (2010), ⁵ÖNORM 7135 (2000), ⁶DIN 51749 (1989), ⁷EN 1860-2 (2005), ⁸Carrillo-Parra et al. (2013).</p>		

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 (García et al., 2012). 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 biomásas que oscilan de 3.44 a 23.1%, en carbón vegetal de 62.61 a 70.36 % (Tabla 5).

Otros autores expresan las siguientes definiciones para carbono fijo:

El carbono fijo es el resultado de la liberación de materia volátil, excluyendo el contenido de cenizas y humedad (Singh et al., 2017).

Velázquez-Martí (2018) define el carbono fijo, como la fracción que se oxida en fase sólida durante la combustión de biomasa.

El carbono fijo es el residuo carbonoso sólido restante de la liberación de volátiles de la biomasa. Está relacionado con la cantidad de cenizas y materia volátil; así, una mayor cantidad de estos componentes se refleja en una menor concentración de carbono fijado (Ruiz-Aquino et al., 2019).

El carbón fijo, es el combustible sólido que queda como residuo después de calentar una muestra de biomasa, se expulsa materia volátil y humedad (Martínez-Gómez et al., 2022).

La expresión para el cálculo del porcentaje de carbón fijo de acuerdo a García et al. (2012), se describe a continuación: Se calcula restando a 100 el porcentaje de cenizas y materia volátil (ecuación 7).

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

(7)

El carbono fijo se considera como una de las características más importantes de los biocombustibles sólidos (Cruz et al., 2020). El carbono fijo está relacionado al material volátil, por otro lado, los porcentajes bajos de carbono fijo son atribuidos a altos contenido de cenizas. También se ha reportado en la literatura que las cortezas contienen un mayor rendimiento de CF y menor contenido de MV, por lo tanto, se esperaría un mejor poder calorífico (Feng et al., 2013). En la Tabla 4 se pueden consultar los principales aspectos del carbono fijo en los biocombustibles.

Tabla 4. Parámetros técnicos del CF de acuerdo con normas para biocombustibles sólidos y efectos en la industria de los biocombustibles.

Ensayo	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los biocombustibles
Carbono fijo	<p>Carbón vegetal > 75%^{1,2}</p> <p>Carbón vegetal > 78%³</p>	<p>Biomásas con alto de CF se consideran útiles para producir carbón y biomásas con altos porcentajes de materia volátil pueden usarse para producir biogás (Ríos-Saucedo, 2021).</p> <p>Materiales lignocelulósicos con alto contenido de CF favorecen la calidad y cantidad de brazas durante la combustión del carbón vegetal (Cruz et al., 2020).</p> <p>Biocombustibles sólidos con alto contenido de CF tienen un poder calorífico favorable (Tenorio et al., 2015; Forero-Núñez et al., 2015), por otro lado, biomásas con bajo CF son adecuados para otros biocombustibles como el biogás y biodiésel (Bandara y Kowshayini, 2017).</p>
<p>¹DIN 51749 (1989), ²EN 1860-2 (2005), ³NBN M11-001 (1984)</p>		

Como se describió anteriormente, el análisis proximal es el método más utilizado para la caracterización de biocombustibles sólidos en muestras de biomasa como: leña, subproductos de la transformación primaria de la madera; astillas, aserrín virutas, polvos finos y cortezas, biomásas acuáticas, residuos agroindustriales, carbón vegetal, entre otras materias primas. En la Taba 5 se pueden consultar resultados de análisis proximales de distintas fuentes de biomasa de la geografía de México.

Tabla 5. Datos seleccionados de análisis proximales de biomásas mexicanas (%).

	Humedad	Material volátil	Cenizas	Carbono fijo	Autores
Biocombustibles comerciales					
Briqueta- <i>Pinus</i> spp.	4.80	85.50	0.26	14.24	Ramírez-Ramírez et al. (2021)
Briqueta- <i>Swartzia cubensis</i>	12.4	83.25	1.69	15.05	Ramírez-Ramírez et al. (2022)
Briqueta- <i>Lysiloma latisiliquum</i>	8.2	84.55	3.94	11.50	
Briqueta- <i>Caesalpinia platyloba</i>	8.4	85.80	2.92	11.28	
Briqueta- <i>Manilkara zapota</i>	8.2	85.10	3.53	11.36	
Briqueta- <i>Swietenia macropylla</i>	8.5	88.85	2.64	8.51	
Briqueta- <i>Quercus</i> spp.	7.1	89.20	1.47	9.32	
Briqueta- <i>Olneya tesota</i>	8.5	79.60	3.70	16.69	
Pellets- <i>Eucalyptus globulus</i>	5.6	80.0	3.1	16.9	Ríos-Saucedo et al. (2021)
Pellets- <i>Populus alba</i>	7.1	82.3	3.5	14.2	
Pellets- <i>Acacia retinoides</i>	4.3	80.6	6.5	16.0	
Pellets- <i>Ricinus communis</i>	6.4	84.3	3.6	12.1	
Pellets- <i>Populus deltoides</i>	9.0	79.7	3.7	16.6	Ruiz-Aquino et al. (2019)
Carbón- <i>Alnus acuminata</i>	1.59	32.64	2.19	65.16	
Carbón- <i>Arbutus xalapensis</i>	2.32	28.40	1.38	70.22	
Carbón- <i>Myrsine juergensii</i>	3.67	34.25	2.29	63.46	

<i>Carbón-Persea longipes</i>	3.45	32.56	4.83	62.61	
<i>Carbón-Prunus serótina</i>	2.33	28.50	1.13	70.36	
Biomosas acuáticas					
<i>Sargassum</i> spp.	15.91	84.63	11.93	3.44	Alvarado-Flores et al. (2022)
<i>Eichhornia crassipes</i>	4.9	61.2	20.1	13.8	Sukarni et al. (2019)
Residuos agroindustriales					
<i>Zea mays</i>	7.04	72.69	7.38	9.96	Moralés-Máximo et al. (2022)
Bagazo de caña	16.07	79.6	4.34	-	Tsai et al. (2006)
Cáscara de coco	11.26	85.4	3.38		
Cáscara de arroz	11.4	65.9	17.0	17.1	Felfli et al. (2011)
Cáscara de café	13.1	73.2	3.7	23.1	
Cáscara de nuez- <i>Carya illinoensis</i>	7.63	69.86	11.55	18.59	Ngangyo et al. (2022)
Maderas y residuos de su transformación primaria					
<i>Abies</i> spp.	-	86.23	0.33	11.13	Martínez-Gómez et al. (2022)
<i>Pinus</i> spp.	-	82.57	0.33	13.45	
<i>Acacia pennatula</i>	-	78.04	4.51	17.44	Ruiz-Aquino et al. (2022)
<i>Arbutus xalapensis</i>	-	81.22	1.54	17.21	
<i>Alnus jorullensis</i>	-	82.76	0.49	16.74	
<i>Liquidambar styraciflua</i>	-	94.70	0.54	4.74	
<i>Pinus patula</i>	-	92.81	0.39	9.28	
<i>P. douglasiana</i>	-	92.84	0.28	6.88	

<i>P. lawsonii</i>	-	84.56	0.17	18.83	
<i>Pinus</i> spp.	10.82	85.40	0.51	14.09	Rutiaga- Quiñones et al. (2020)
<i>Quercus</i> spp.	12.38	84.91	1.02	14.07	
<i>Swartzia cubensis</i>	8.66	85.53	1.32	13.14	
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	9.50	87.33	3.34	9.32	
<i>Caesalpinia platyloba</i>	13.24	81.71	2.20	16.08	
<i>Manikara zapota</i>	10.56	82.11	3.38	14.5	
<i>Swietenia macrophylla</i>	8.51	86.46	2.14	11.42	
<i>Olneya tesota</i>	5.01	81.86	1.44	16.69	
Ramas de lima persa	6.71	87.42	0.48	12.09	
Ramas de naranja	4.91	90.50	0.38	9.10	
Ramas de <i>Persea americana</i>	6.57	83.87	1.22	8.34	Soria-González et al. (2022)

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 biomásas, 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.

- Almaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- Alvarado-Flores, J. J. y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(2), 221-238.
- Alvarado-Flores, J. J., Alcaraz-Vera, J. V., Ávalos-Rodríguez, M. L., Rutiaga-Quiñones, J. G., Valencia-Espino, J., Guevara-Martínez, S. J., Ríos, E. T. and Zarraga-Aguado, 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.
- ASTM E830-87. (2004). Standard test method for ash in the analysis sample of refuse derived fuel. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM E897-88. (2004). Standard test method for volatile matter in the analysis sample of refuse derived fuel. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM E871-82. (2006). Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D1102-84. (2007). Standard test method for ash in wood. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM E872-82. (2013). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bárcenas-Pazos, G. M., Ríos-Villa, R., Aguirre-Rivera, J. R., Juárez-Flores, B. I. and Honorato-Salazar, J. A. (2008). Chemical composition and

- relative basic density of two shrub white oak wood species from the Sierra de Álvarez, SLP, Mexico. *Madera y Bosques*, 14(3), 81-94.
- Bandara, W. and Kowshayini, P. (2017). Evaluation of the Performances of Biomass Briquettes Produced with Invasive *Eichornia crassipes* (Water Hyacinth), Wood Residues and Cow Dung for Small and Medium Scale Industries. *J. Fundam Renewable Energy and Applications*, 8, 1-8.
- 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.
- Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., González-Rodríguez, H., Garza-Ocañas, F., Prieto-Ruíz, J.A., Corral-Rivas, J. A. y Vega-Nieva, J. J. (2014) *Tecnologías para la transformación de la biomasa en carbón vegetal*. In: Técnicas en el manejo sustentable de los recursos naturales (ed. Garza, O.F., Guevara, G.J.A., Villalón, M.H., Carrillo, P.A.). Pp. 142-165, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., Prieto-Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J. y 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.
- Carrillo-Parra, A., Foroughbakhch-Pournavab, R. y Bustamante-García, V. (2013). Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) MC Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & JW Grimes elaborado en horno tipo fosa. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 62-71.
- Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch-Pournavab, R., Rutiaga-Quiñones, J. G. and Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *Peer J*, 6, e5504.

- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E. y Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 77-88.
- Cruz-Montelongo, C. D. L., Herrera-Gamboa, J., Ortiz-Sánchez, I. A., Ríos-Saucedo, J. C., Rosales-Serna, R. y Carrillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621971.
- Demirbaş, A. (2003). Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management*, 44(9), 1465-1479.
- DIN 51749. (1989). Testing of solid fuels- Grill charcoal and grill charcoal briquettes: Requirements and test methods.
- EN 1860-2. (2005). Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes. Requirements and test methods.
- EN 14961-2. (2013). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial.
- Felfli, F. F., Rocha, J. D., Filippetto, D., Luengo, C. A. and Pippo, W. A. (2011). Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 236-242.
- Feng, S., Cheng, S., Yuan, Z., Leitch, M. and Xu, C. C. (2013). Valorization of bark for chemicals and materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 560-578.
- Forero-Nuñez, C. A., Jochum, J. and Sierra, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17-23.

- Francescato, V., Antonini, E., Bergomi, L. Z., Metschina, C., Schnedl, C., Krajnc, N., Kosciak, K., Nocentini, G. y Stranieri, S. (2008). *Manual de combustibles de madera producción requisitos de calidad comercialización*. AIEL Italian Agriforestry Energy Association.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G. and Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249-258.
- García-Maraver, A., Rodríguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Díaz, L. F. and Zamorano, M. (2015). Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel Processing Technology*, 129, 1-7.
- Gassner, M. and Maréchal, F. (2009). Thermo-economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 33(11), 1587-1604.
- Grover, P. D. and Mishra, S. K. (1996). *Biomass briquetting: technology and practices*. Vol. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Holt, G. A., Blodgett, T. L. and Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products*, 24(3), 204-213.
- ISO 17225-2. (2014). Solid biofuels – Fuel specifications and classes, Part 2: Graded wood pellets. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 17225-4. (2014). Solid biofuels – Fuel specifications and classes. Part 4: Graded wood chips. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Koppejan, J. and Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.

- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351-360.
- López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., Alcaraz-Vera J. V, Rutiaga-Quiñones, J. G., Zárate-Medina, J., Ávalos-Rodríguez, M.L. and Morales-Máximo, M. (2020). A prospective study of the exploitation of pelagic *Sargassum* spp. as a solid biofuel energy source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706.
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G. and Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287-296.
- Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., López-Albarrán, P. and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Research*, 60(2), 281-292.
- Martínez-Gómez, O., Pintor-Ibarra, L. F., Rutiaga-Quiñones, J. G. and Corona-Terán, J. (2022). Chemical Composition and Energy Evaluation of *Abies* spp. and *Pinus* spp. Sawdust Collected as a Byproduct of the Primary Wood Sawing. *South-East European Forestry: SEEFOR*, 13(2), 89-96.
- Masera, O. and Sacramento Rivero, J. C. (2022). Promoting a sustainable energy transition in Mexico: The role of solid biofuels. *BioEnergy Research*, 15(4), 1691-1693.
- Massuque, J., De Assis, M. R. and Trugilho, P. F. (2020). Characterization of Miombo species used by rural communities as fuelwood in Northern Mozambique. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-10.
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Rojas, S. and Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, 88(11), 2106-2112.

- Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K. and Darkwa, N. A. (2014). Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1), 1-9.
- Morales-Máximo, C. N., López-Sosa, L. B., Rutiaga-Quiñones, J. G., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Pintor-Ibarra, L. F., López-Miranda, A., Delgado-Domínguez, S. N., Rodríguez-Magallón, M. C. and Morales-Máximo, M. (2022). Characterization of Agricultural Residues of *Zea Mays* for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies*, 15(19), 6870.
- NBN M11-001. (1984). Charcoal and charcoal briquettes for domestic use: designationspecification-tests
- Ngangyo Heya, M., Pournavab, F. R., Carrillo-Parra, A. and Colin-Urieta, S. (2014). Bioenergy potential of shrub from native species of northeastern Mexico. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 2(12), 475-483.
- Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchk-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Zelinski, V. and Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific value and chemical composition of five semi-arid Mexican tree species. *Forests*, 7(3), 58.
- Ngangyo Heya, M., Romo Hernández, A. L., Foroughbakhch Pournavab, R., Pintor-Ibarra, L. F., Díaz-Jiménez, L., Heya, M. S., Salas Cruz, L. R. and Carrillo Parra, A. (2022). Physicochemical characteristics of biofuel briquettes made from pecan (*Carya illinoensis*) pericarp wastes of different particle sizes. *Molecules*, 27(3), 1035.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O. and Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235-242.

- Núñez-Retana, V. D., Escobedo-Bretado, M. A., Quiñones-Reveles, M., Ruiz-Aquino, F. y 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. and Thek, G. (2010). *The pellet handbook* (1st ed.). London-Washington DC: Earthscan.
- ÖNORM M 7135. (2000). Compressed wood or compressed bark in natural state-pellets and briquettes, requirements and test specifications, Österreichisches Normungsinstitut [Austrian Standards Institute], Vienna, Austria.
- Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. D. C. O., Santos, L. C. and Vital, B. R. (2012). Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 1-8.
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. and Rutiaga-Quñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood Research*, 62(6), 849-861.
- Pintor-Ibarra, L. F., Rivera-Prado, J. J., Ngangyo-Heya, M. and Rutiaga-Quñones, J. G. (2018). Evaluation of the chemical components of *Eichhornia crassipes* as an alternative raw material for pulp and paper. *BioResources*, 13(2), 2800-2813.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M. and Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.
- Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 82, 447-454.

- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C. y Rutiaga-Quinones, J. G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources*, 16(2), 2249.
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J. J., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N. and Rutiaga-Quinones, J. G. (2022). Evaluation of Selected Physical and Thermal Properties of Briquette Hardwood Biomass Biofuel. *BioEnergy Research*, 15(3), 1407-1414.
- Relova, I., Vignote, S., León, M. A. and Ambrosio, Y. (2009). Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. *Biomass and Bioenergy*, 33(10), 1351-1357.
- Ríos-Saucedo, J.C., Rosales-Serna, R., Jiménez-Ocampo, R., Domínguez-Martínez, P. A., Carrillo-Parra, A. y Valenzuela-Nuñez, L. M. (2021). Calidad de pélets a partir de biomasa de ocho especies dendroenergéticas de crecimiento rápido. *Agrociencia*, 55(6), 557-568.
- Rodríguez, J. L., Álvarez, X., Valero, E., Ortiz, L., de la Torre-Rodríguez, N. y Acuña-Alonso, C. (2021). Influence of ashes in the use of forest biomass as source of energy. *Fuel*, 283, 119256.
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Santiago-García, W., Fuente-Carrasco, M. E., Sotomayor-Castellanos, J. R. and Carrillo-Parra, A. (2019). Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Research*, 64(1), 71-82.
- Ruiz-Aquino, F., Jiménez-Mendoza, M. E., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Aquino-Vásquez, C. y Rutiaga-Quinones, J. G. (2022). Energy Properties of 22 Timber Species from Oaxaca, Mexico. *South-East European Forestry: SEEFOR*, 13(2), 107-113.

- 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., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J. y Lujan-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529.
- Sánchez, D. (2012). Biocombustibles y calderas de biomasa: la biomasa, una oportunidad para las entidades locales. CENER. Consultado el 18 de agosto de 2023. <https://cdn.website-editor.net/4efacd060c2e428191f9ea3f3f34ec08/files/uploaded/biomasa.pdf>
- Shen, D. K., Gu, S., Luo, K. H., Bridgwater, A. V. and Fang, M. X. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 88(6), 1024-1030.
- Singh, Y. D., Mahanta, P. and Bora, U. (2017). Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production. *Renewable Energy*, 103, 490-500.
- Soria-González, J. A., Tauro, R., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M. y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Avocado tree pruning pellets (*Persea americana* Mill.) for energy purposes: Characterization and quality evaluation. *Energies*, 15(20), 7514.
- Sukarni, S., Zakaria, Y., Sumarli, S., Wulandari, R., Ayu Permanasari, A. and Suhermanto, M. (2019). Physical and chemical properties of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a sustainable biofuel feedstock. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 515, p. 012070). IOP Publishing.
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M. and Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380-389.

- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M. and Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1), 482-498.
- Tsai, W. T., Lee, M. K. and Chang, D. Y. (2006). Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 76(1-2), 230-237.
- Tumuluru, J S, Sokhansanj, Shahabaddine, Lim, C Jim, Bi, X T, Lau, A K, Melin, Staffan, Oveisi, E. and Sowlati, T. (2010). Quality of wood pellets produced in British Columbia for export. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(6), 1013-1020.
- UNE EN 14774-3. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- UNE-EN ISO 18122. (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas. AENOR. Madrid, España.
- UNE-EN ISO 18123. (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil. AENOR. Madrid, España.
- UNE-EN ISO 18134-1 (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia. AENOR. Madrid, España.
- Van der Loo, S. and Koppejan, H. (2002). *Handbook of biomass: Combustion and cofiring*. Prepared by Task 32 of the Implementing Agreement on Bioenergy Under the Auspices of the International Energy Agency.
- Vamvuka, D., El Chatib, N., and Sfakiotakis, S. (2011). Measurements of ignition point and combustion characteristics of biomass fuels and their blends with lignite. *Combustion*, 2015, 95.

- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Song, Y. C., Li, W. Y. and Feng, J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, 208, 377-409.
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B. J. and Hupa, M. (2011). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 725-733.
- Whittaker, C. and Shield, I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 1-11.

Capítulo 6: Análisis elemental en la biomasa con fines energéticos

Fernando Daniel Méndez-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. Av. Francisco J. Múgica S/N, Edificio "D", Ciudad Universitaria. C.P.58040, Morelia, Michoacán, México.

**Autor de correspondencia: 1614346@umich.mx*

Resumen

El análisis elemental es un método esencial para determinar la cantidad de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en la biomasa, independientemente de su origen y estado. Estos elementos juegan un papel crucial en la calidad del combustible y su potencial energético. Durante la combustión, el carbono y el hidrógeno se oxidan, influyendo en el poder calorífico mediante la formación de CO₂ y agua. El oxígeno es un indicador clave del rango de oxidación en diferentes procesos, especialmente en la formación de óxidos de nitrógeno liberados durante la combustión de gases. Cuando hay una mayor cantidad de oxígeno presente, puede disminuir el

poder calorífico del combustible. El contenido de nitrógeno en la biomasa puede generar emisiones dañinas de óxidos de nitrógeno y causar problemas ambientales. Además, es vital limitar la presencia de contaminantes como el cloro y el azufre, ya que pueden dar lugar a emisiones problemáticas y dañar los equipos de combustión. Conocer la composición elemental de la biomasa es fundamental para comprender las reacciones durante la combustión, la liberación de calor y productos.

Palabras clave: análisis último, biocombustibles, CHONS, materiales lignocelulósicos, método Kjeldahl.

Introducción

El análisis elemental es un método que permite determinar la cantidad total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre que se encuentra en una amplia variedad de muestras, ya sean de origen orgánico o inorgánico, y tanto en estado sólido como líquido (ICB, 2016). En cuanto al término "biomasa", éste se refiere a toda la materia orgánica, tanto viva como muerta, que proviene de la fotosíntesis directa o indirecta de plantas o animales. Es importante resaltar que la biomasa no incluye carbón, petróleo ni restos fosilizados de organismos. Es el material más abundante en nuestro planeta y se estima que hay alrededor de 550 a 560 mil millones de toneladas de carbono en forma de biomasa (Pocha et al., 2023). Por otra parte, el uso de biomasa como fuente de energía presenta una importante ventaja al contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de CO₂ en comparación con la utilización de hidrocarburos. Esta característica resulta

en una considerable disminución del impacto negativo que los combustibles fósiles generan en el cambio climático (Callejas y Quezada, 2009).

Los elementos primordiales que constituyen la biomasa son el carbono, oxígeno e hidrógeno, aunque en muchos casos también se encuentran presentes en proporciones reducidas el nitrógeno y el azufre. Estos elementos influyen significativamente en la calidad de la biomasa como combustible (Raju et al., 2014). A continuación, se muestran algunas técnicas para llevar a cabo un análisis elemental de la biomasa.

Técnicas de análisis elemental (CHONS)

Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno

El contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno se puede llevar a cabo en apego a la norma UNE-EN ISO 16948 (2015). De manera breve, se pesa, aproximando al 0,1% (relativo), la cantidad de muestra de ensayo recomendada por el fabricante del instrumento según proceda para el tipo de instrumento y las concentraciones esperadas de carbono, hidrógeno y nitrógeno. La porción de ensayo se debe pesar directamente en la cápsula de la muestra en el caso de un analizador micro o semi-micro. De otro modo se puede pesar directamente o transferirse desde un recipiente de pesada adecuado.

Durante el análisis elemental, se somete una cantidad preestablecida de la muestra a una combustión en presencia de oxígeno o una mezcla de oxígeno y gas portador. Este proceso transforma la muestra en cenizas y da lugar a la formación de gases de combustión. Los gases principales generados

incluyen dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno elemental y/u óxidos de nitrógeno, así como óxidos y haluros de azufre e hidrógeno.

Después de la combustión, se realiza un proceso de tratamiento en los productos resultantes para asegurar que cualquier hidrógeno vinculado a los compuestos de azufre o haluros se libere en forma de vapor de agua. Además, los óxidos de nitrógeno son reducidos a nitrógeno elemental y se eliminan los productos de combustión que podrían afectar las etapas posteriores del análisis de gases. Por último, mediante el uso de procedimientos instrumentales adecuados para el análisis de gases, se determinan las cantidades de dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno presentes en la corriente gaseosa.

En la expresión de resultados, los contenidos totales de carbono, hidrógeno y nitrógeno de la muestra del biocombustible sólido, según se ha analizado, se deben registrar como un porcentaje de masa. Se registran los resultados en base anhidra, como la media de dos réplicas. Se debe calcular usando las ecuaciones 1, 2 y 3:

1. Contenido de carbono:

$$C_x = C_p * \frac{100}{100-u} \quad (1)$$

2. Contenido de nitrógeno:

$$N_x = Np * \frac{100}{100-u} \quad (2)$$

3. Contenido de hidrógeno:

$$H_x = \left(H_p - \frac{u}{8,937} \right) * \frac{100}{100-u} \quad (3)$$

Donde:

x: base anhidra

p: según se ha determinado.

u: contenido de humedad de la muestra para el análisis general cuando se analiza.

El factor constante es 8.937 para el cálculo de la concentración de hidrógeno en el agua que está presente en la muestra. El factor se obtiene de la fórmula molar del agua (H₂O) y el peso atómico del hidrógeno (1.008) y oxígeno (15.9994)

El contenido de oxígeno se calcula por diferencia según Ghetti et al. (1996).

Determinación del contenido total de azufre y cloro

El contenido de azufre y cloro se hace en base a la norma UNE-EN ISO 16994 (2017). En los biocombustibles sólidos, se encuentran niveles variables de azufre y cloro, los cuales tienden a transformarse en óxidos de azufre y cloruros durante el proceso de combustión. Estos elementos y sus derivados resultantes pueden tener un impacto considerable en la corrosión y generar emisiones perjudiciales para el medio ambiente.

Las muestras de biocombustibles sólidos generalmente se queman en forma de pellets, debido a la baja densidad y a su comportamiento de la combustión. Brevemente, se toma una muestra de aproximadamente 1 g (a menos que la bomba de combustión esté diseñada para otras cantidades de muestra), para la detección de las cantidades de Cl y S se usa el método de Cromatografía Iónica el cual es el más recomendado para la detección de sulfato y cloruro. Los resultados se deben registrar como la media de determinaciones por duplicado. Los resultados se deben calcular en base según seca.

Cloro total

El contenido total de cloro en la muestra en base seca, $w_{Cl,d}$, expresado en la fracción de masa (%), viene dada por la fórmula (4):

$$w_{Cl,d} = \frac{(a - b) \times c}{m} \times 100 \times \frac{100}{(100 - m_{ad})} \quad (4)$$

donde

a: es la concentración de cloruro en la disolución en mg/L;

b: es la concentración de cloruro en la disolución de ensayo del banco en mg/L;

c: es el volumen de la disolución en L;

m: es la masa de la porción de ensayo utilizada en mg;

m_{ad} : es el contenido de humedad en la muestra de ensayo en fracción de masa (%).

Azufre total

El contenido total de azufre en la muestra en base seca, $w_{s,d}$, expresado en la fracción de masa (%), viene dada por la formula (5):

$$w_{s,d} = \frac{(a - b) \times c}{m} \times 0.3338 \times \frac{100}{(100 - m_{ad})} \quad (5)$$

a: es la concentración de sulfato en la disolución en mg/L;

b: es la concentración de sulfato en la disolución de ensayo del banco en mg/L;

c: es el volumen de la disolución en L;

m: es la masa de la porción de ensayo utilizada en mg;

0.3338: es la relación estequiométrica de las masas molares relativas del azufre y sulfato;

m_{ad} : es el contenido de humedad en la muestra de ensayo en fracción de masa (%).

Método Kjeldahl

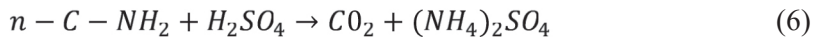
El método Kjeldahl se fundamenta en la medición del nitrógeno en diversas muestras de origen orgánico, siendo crucial en áreas como la industria agroalimentaria, farmacéutica y ambiental. Este proceso es valioso para evaluar contenidos nitrogenados y su aplicación abarca múltiples campos de análisis (García-Martínez et al., 2013). Aunque el método Kjeldahl es

efectivo para medir nitrógeno orgánico y amoniacal en muestras, no es adecuado para muchos compuestos orgánicos nitrogenados, como nitritos y nitratos, debido a la conversión incompleta del nitrógeno en amoníaco. Sin embargo, produce resultados precisos en muestras que contienen nitrógeno orgánico, incluyendo proteínas y nitrógeno amoniacal (Möller, 2009).

El proceso se puede desglosar en tres fases clave: la digestión de la muestra, la destilación y la medición del amoníaco (donde la titulación juega un papel primordial) (Sáez-Plaza et al., 2013). La secuencia a seguir varía según si el nitrógeno liberado durante la destilación se recolecta en una solución de ácido bórico o en un exceso conocido de ácido clorhídrico o sulfúrico estándar. Esta elección influirá en el enfoque de la siguiente fase de valoración y en los reactivos utilizados (García-Martínez et al., 2013).

(a) Fase de digestión. Mediante la aplicación de ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador y calentamiento, se convierte el nitrógeno de origen orgánico en ion amonio, como se describe en la ecuación 6.

catalizadores/calor



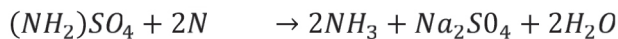
Durante el proceso se coloca una cantidad de 1 y 5 gramos de la muestra dentro de un tubo de mineralización. Luego, se añaden 3 gramos de un catalizador, generalmente una combinación de sales de cobre, óxido de titanio y/o óxido de selenio, con una fórmula típica de $K_2SO_4:CuSO_4:Se$

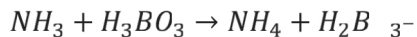
(10:1:0.1 en peso). A continuación, se incorporan 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y 5 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂). El paso subsiguiente implica la digestión a una temperatura de 420 °C, cuya duración varía según la cantidad y el tipo de muestra. La finalización de la digestión se identifica por el distintivo color verde esmeralda que adquiere la solución. Durante esta fase, el nitrógeno de las proteínas se convierte en sulfato de amonio mediante la acción del ácido sulfúrico caliente. Actualmente, se emplean digestores automáticos capaces de procesar múltiples muestras simultáneamente (Figura 1).



Figura 1. Unidad de digestión. Tomado de García et al. (2013).

(b) Fase de destilación (Figura 2). Se realiza la alcalinización de la muestra digerida, lo que provoca la liberación del nitrógeno en forma de amoníaco, siguiendo la ecuación 7. El amoníaco que se destila se captura mediante un exceso no especificado de ácido bórico, según se indica en la ecuación 8.





Proceso: luego de enfriar, se añaden 50 mL de agua destilada al tubo de digestión. Posteriormente, se coloca en el soporte del destilador y se introduce una cantidad adecuada de hidróxido de sodio 10 N (aproximadamente 50 mL) para lograr una alcalinización intensa del entorno, lo que resulta en la liberación del amoníaco a partir de las sales amónicas. El vapor de agua introducido durante la destilación arrastra consigo el amoníaco liberado y lo recoge en una solución de ácido bórico al 4 % en peso/volumen.



Figura 2. Unidad de destilación. Tomado de García-Martínez et al. (2013).

(c) Fase de valoración. La determinación cuantitativa del nitrógeno amoniacal se lleva a cabo mediante una titulación ácido-base del ion borato formato, utilizando ácido clorhídrico o sulfúrico, y empleando una solución alcohólica que contiene una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno

como indicador (según la ecuación 9). Los equivalentes de ácido consumidos en la titulación equivalen a los equivalentes de amoníaco destilados durante el proceso.



A partir de la titulación, es posible determinar la cantidad de equivalentes de nitrógeno capturados, y utilizando esta información, se puede calcular el contenido de nitrógeno en la muestra, expresado como porcentaje.

Importancia del análisis elemental en la biomasa con fines energéticos

Según Rutiaga-Quñones et al., (2020) publican que es muy importante conocer la composición elemental de la biomasa para su uso energético, ya que esta permitirá conocer las reacciones que se lleven a cabo en el proceso de combustión, además, determinar los reactivos; así como los productos y el calor que desprenden.

En la Tabla 1 se pueden consultar algunos aspectos importantes acerca de la composición elemental de la biomasa con fines energéticos. Por otra parte, en la Tabla 2 se pueden visualizar los datos del análisis elemental para distintas biombras seleccionadas.

Tabla 1. Parámetros técnicos del análisis elemental en la biomasa de acuerdo con normas para biocombustibles sólidos y efectos en la industria de los biocombustibles.

Ensayo	Parámetros técnicos	Aspectos en la industria de los Biocombustibles
Análisis elemental	S < 0.08 % N < 0.3%¹	<p>El C y el H se oxidan durante la combustión mediante reacciones exotérmicas (formación de CO₂ y agua) y, por tanto, influyen en el combustible (Oberberger y Thek, 2004). El oxígeno es un indicador clave del rango de oxidación en diferentes procesos, especialmente en la formación de óxidos de nitrógeno liberados durante la combustión de gases. Cuando hay una mayor cantidad de oxígeno presente, puede disminuir el poder calorífico del combustible (Calventus et al., 2009).</p>
	S < 0.03 % N ≤ 0.5%²	<p>Las especies de biomasa herbácea presentan menor contenido de carbono que las de biomasa leñosa lo cual repercute directamente en su poder calorífico bruto, dando como resultado un mayor poder calorífico bruto en la biomasa leñosa (Tabla 3) (Oberberger y Thek, 2004).</p>
	N: 0.10 a 0.50%³	<p>Según Oberberger y Thek (2004), si las muestras contienen un alto nivel de nitrógeno, su uso estará directamente relacionado con sustancias prohibidas durante el proceso de densificado de la biomasa, puesto que da lugar a un aumento de las emisiones de NOx. En la atmósfera, los óxidos de nitrógeno pueden reaccionar y convertirse en nitratos y ácido nítrico. Estos compuestos contribuyen a la</p>

		<p>formación de la lluvia ácida, que afecta tanto a los ecosistemas con su rica diversidad de flora y fauna como a las estructuras humanas, ya que los ácidos pueden causar corrosión en diferentes artefactos y materiales (Pérez-Valencia, 2020).</p> <p>Por otra parte, los contaminantes químicos presentes en la materia prima o aditivos, como Cl y S, deben ser limitados debido a su impacto negativo en el proceso de combustión.</p> <p>Concentraciones elevadas de estos elementos pueden generar emisiones problemáticas, como HCl y SOx, además de causar la formación de depósitos y corrosión en los equipos de combustión (Oberberger y Thek, 2004).</p>
<p>¹ÖNORM M 7135 (2000), ²EN 14961-2 (2011), ³ISO 17225-2 (2014)</p>		

Tabla 2. Análisis elemental de biomosas seleccionadas.

Biomasa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Referencia
<i>Manilkara zapota</i>	49.99	6.12	43.62	0.27	-	Rutiaga-Quiñones et al. (2020)
<i>Swartzia cubensis</i>	49.62	6.19	43.77	0.42	-	
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	49.13	6.02	44.49	0.36	-	

<i>Swietenia macrophylla</i>	49.67	6.08	44.11	0.14	-	
<i>Pinus</i> spp.	50.47	6.30	43.15	0.06	-	
<i>Quercus</i> spp.	50.63	5.96	43.27	0.14	-	
Ramas de lima persa	50.10	6.01	43.35	0.54	-	
Ramas de naranja	49.89	5.87	43.88	0.36	-	
Cáscaras de limón	50.67	5.24	43.36	0.73	-	
<i>Ceiba aesculifolia</i>	46.9	7.1	45.7	0.18	0.08	Mendez-Zetina (2022)
<i>Sargassum</i> spp.	26.70	4.23	67.53	1.35	0.19	Gasca-Ferreira (2021)
Cáscara de café	45.06	6.42	45.51	2.53	0.48	García et al. (2012)
Mazorca de Maíz	44.78	6.02	48.77	0.22	0.21	
Astillas de eucalipto	44.77	6.33	48.51	0.14	0.15	
Cáscara de arroz	26.69	2.88	70.05	0.21	0.17	
Cáscara de pistachio	44.69	5.16	49.87	0.11	0.18	
Cáscara de coco	47.93	6.05	45.63	0.15	0.24	
Residuos de la cáscara de limón	42.95	6.56	48.98	1.08	0.42	
Ramas de <i>Persea americana</i>	46.95	5.95	46.27	0.81	0.01	Soria-González et al. (2022)

Bagazo de caña	42.21	5.47	52.08	0.22	0	Manals-Cutiño et al. (2015)
Cáscara de Plátano	48.40	7.27	42.91	1.36	0.06	Rojas et al. (2019)

Conclusión

El análisis elemental de CHONS en la biomasa es una herramienta fundamental para comprender la composición química de este recurso renovable utilizado con fines energéticos. Al realizar una precisa determinación de las cantidades de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre presentes en la biomasa, podremos comprender las reacciones que ocurren durante el proceso de combustión, identificar los elementos iniciales involucrados (reactivos), así como los productos generados y la cantidad de calor liberado.

El contenido de carbono e hidrógeno es especialmente relevante, ya que son los principales componentes que contribuyen al contenido energético de la biomasa. El análisis de nitrógeno y azufre también es importante, ya que estos elementos pueden afectar la eficiencia de ciertos procesos de conversión y pueden tener implicaciones ambientales.

El conocimiento proporcionado por el análisis elemental de CHONS permite diseñar y optimizar tecnologías para aprovechar la biomasa como una fuente de energía renovable y sostenible. Además, ayuda a evaluar la viabilidad económica y ambiental de los proyectos relacionados con la producción de energía a partir de biomasa.

Referencias.

- Calventus, Y. A., Carreras, R., Casals, M., Colomer, P., Costa, M., Jaén, A., Monserrat, S., Olivia, A., Quera, M. y Roca, X. (2009). *Tecnología Energética y Medio Ambiente* - I. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- 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.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., and Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249-258.
- García-Martínez, E. M., Fernández-Segovia, I., y Fuentes-López, A. (2013). Aplicación de la determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con una base fuerte. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Gasca-Ferreya, L. S. (2021). Análisis cinético de la descomposición térmica de *Sargassum* spp. como fuente renovable de energía. Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Ghetti, P., Ricca, L., and Angelini, L. (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 25 de julio 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.
- Manals-Cutiño, E. M., Penedo-Medina, M., y Salas-Tort, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química*, 35(2), 244-255.
- Méndez-Zetina, D. F. (2022). Caracterización química y térmica de *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. y Baker. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Möller, J. (2009). Kjeldahl-still going strong. *Focus*, 33(1), 14-16.
- Obernberger, I., and 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.
- Pérez-Valencia, A. F. (2020). Efecto en las emisiones de NOx en el proceso de la combustión con mezclas de carbón y bagazo de caña por medio del método de co-firing. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Pocha, C. K. R., Chia, W. Y., Kurniawan, T. A., Khoo, K. S., and 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., and 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.

- Rojas, A. F., Rodríguez-Barona, S., y Montoya, J. (2019). Evaluación de alternativas de aprovechamiento energético y bioactivo de la cáscara de plátano. *Información Tecnológica*, 30(5), 11-24.
- 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., and Asuero, A. G. (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.
- Soria-González, J. A., Tauro, R., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Avocado tree pruning pellets (*Persea americana* Mill.) for energy purposes: Characterization and quality evaluation. *Energies*, 15(20), 7514.
- 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: Microanálisis de la ceniza de 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, y aún mayor cantidad en maderas tropicales. En otros materiales lignocelulósicos se ha detectado mayor cantidad de cenizas (10 a 22%). En la ceniza, pueden estar presentes diferentes sustancias inorgánicas, que en parte son el reflejo de la composición mineral de los suelos donde las plantas se han desarrollado, como el N, S, Cl, F, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn, también

el Li, Rb, Pu, e incluso tierras raras. 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, conocidas como técnicas emergentes. En el presente trabajo, se da información general sobre las técnicas que han sido empleadas para la identificación de sustancias minerales, y cuando ha sido posible, se han dado algunos ejemplos sobre la presencia de elementos químicos en diversas biomasas lignocelulósicas.

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

Introducción

El suelo donde crecen las plantas es un sistema formado por sólidos orgánicos e inorgánicos, agua, aire y microorganismos. En este sistema, estas fases presentan interacciones que afectan unas a otras; existe alteración en la calidad del aire debido a las reacciones entre los sólidos, y éstos son meteorizados por el aire y el agua, y los microorganismos son catalizadores de muchas reacciones que se llevan a cabo en dicho sistema. Se trata principalmente de reacciones bioquímicas realizadas por los microorganismos, y para los elementos carbono, nitrógeno y azufre, la función de los microorganismos es importante en la velocidad de las reacciones. Los procesos catalíticos son afectados por diversos factores,

como la energía derivada de la fotosíntesis, clima, intercambio gaseoso con la atmósfera y por la composición mineral del suelo (Ortega-Torres, 1981).

La química del suelo juega un rol importante para el entendimiento de la fertilidad del suelo, donde las plantas crecen tomando los nutrimentos minerales que requieren para su desarrollo. Los elementos indispensables para las plantas se consideran como macronutrientes (C, H, O, N, S, Mg, P, K y Ca), cuyos requerimientos son relativamente grandes y los micronutrientes u oligoelementos (B, Cl, Mn, Zn, Cu, Fe, V, y Mo) que son requeridos en pequeñas cantidades; el nitrógeno y azufre gaseosos son absorbidos por las hojas de la atmósfera (Ortega-Torres 1981; Navarro-Blaya y Navarro-García 2003). Las plantas requieren para su desarrollo solamente unos pocos elementos químicos, tomados en forma de sales minerales, pero con frecuencia absorben otros elementos presentes en el suelo; en vegetales superiores se han encontrado más de sesenta elementos químicos (Navarro-Blaya y Navarro-García 2003), incluso tierras raras (Fengel y Wegener, 1983).

Es conocido que los vegetales y algunas bacterias convierten materia orgánica al usar materia inorgánica y luz, mediante el proceso de fotosíntesis. Así, la energía lumínica se transforma en energía química, en donde el Nicotín Adenín Dinucleótido Fosfato (NADPH) y el Adenosín Trifosfato (ATP) son las primeras moléculas en las que la energía química se almacena. Posteriormente, se sintetizan hidratos de carbono a partir de la reducción del bióxido de carbono, debido al poder reductor del NADPH y

del potencial energético del grupo fosfato del ATP (Kramer y Kozlowski, 1979). Esta energía, atrapada mediante el proceso de fotosíntesis, es responsable de la producción de toda la materia orgánica no fosilizada, es decir, la biomasa (Ortega-Torres, 1981; Velázquez-Martí, 2018).

Existen diversos tipos y fuentes de biomasa, pero aquí se hará énfasis principalmente a la biomasa lignocelulósica, procedente de los sistemas forestales, como diferentes especies de árboles y restos y residuos derivados del aprovechamiento industrial de la madera (Velázquez-Martí, 2018). Como su nombre lo indica, estos materiales lignocelulósicos están formados por celulosa, hemicelulosas, lignina, sustancias extraíbles y sustancias inorgánicas. El análisis último o elemental de la madera indica que en promedio contiene 50% de carbono, 43% de oxígeno y 6 % de hidrógeno, y el resto corresponde a nitrógeno y sustancias inorgánicas (Fengel y Wegener, 1983); a excepción de las sustancias minerales, estos elementos suelen llamarse bioelementos primarios o principales (Ortega-Torres, 1981).

En el proceso de combustión de la biomasa lignocelulósica, tanto su composición química y su composición elemental, influyen en los gases generados y en la composición de las cenizas (de Lucas Herguedas et al. 2012), que es el residuo sólido inorgánico que se produce en este proceso oxidativo completo de la biomasa a altas temperaturas (LeeCarter, 2012). El contenido de cenizas en maderas de clima templado varía de 0.1 a 1.0% y en maderas tropicales suele ser mayor (Fengel y Wegener, 1983), pero su

cantidad está influenciada por la edad del árbol y su localización dentro de él y por las condiciones del suelo y medio ambiente (Fengel y Wegener, 1983; Mohan et al., 2006). En aserrín de maderas de pino fueron encontrados valores de cenizas de 0.27 a 0.95%, mientras que en maderas tropicales el contenido varió de 1.32 a 3.38% y en maderas de encino de 1.02 a 3.12% (Rutiaga-Quiñones et al., 2020). Otros materiales lignocelulósicos pueden contener mayor cantidad de cenizas: cáscara de arroz 22.15%, paja de arroz 14.65%, girasol 11.53%, vaina de la hoja de trigo 10.48% (El-Sayed y El-Samni, 2006).

Las sustancias minerales de la biomasa incluyen algunos iones metálicos que son esenciales para el desarrollo del árbol (Fengel y Wegener, 1983; Mohan et al., 2006). Los componentes más abundantes en la madera son Ca, K y Mg (Fengel y Wegener, 1983) y el orden de concentración de la composición catiónica mayoritaria en plantas es $Ca > K > Na = Mg$, que es cercana a la disponibilidad en los suelos: $Ca > Mg > K = Na$ (Ortega-Torres, 1981). Para maderas de coníferas y latifoliadas, los típicos elementos químicos, además de los bioelementos primarios, son los siguientes: N, S, Cl, F, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn (UNE-EN 14961-1, 2011). Además, se han encontrado en vegetales superiores Li, Rb, Pu (Navarro-Blaya y Navarro-García, 2003) y tierras raras (Fengel y Wegener, 1983), que están presentes en la corteza terrestre (Nordmann, 1979).

Aun cuando madera, como combustible, tenga la ventaja de que contiene generalmente bajo contenido de cenizas y de azufre (Ince, 1979; Kollmann, 1981), es importante conocer la composición mineral de este residuo sólido derivado de la combustión, por los problemas que puedan ocasionar en el proceso de combustión. Para la identificación de los componentes inorgánicos presentes en plantas (y animales) existen diferentes métodos o técnicas, 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.

Técnicas químicas analíticas

Análisis por química húmeda

También es conocido como análisis por vía húmeda o análisis químico húmedo 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 (Ayres 1970). El primero ayuda a detectar los elementos y el segundo determina su cantidad presente en la muestra. Estas técnicas analíticas permiten determinar el estado de oxidación de los cationes, mientras que con otras técnicas instrumentales generalmente no proporcionan esta información. Para realizar un análisis, en ocasiones será necesario solubilizar la muestra; suelen usarse algunos ácidos como HNO_3 , HCl , HF o H_2SO_4 (Nordmann, 1979). Cuando la muestra está en disolución, pueden aplicarse las siguientes técnicas: colorimetría, volumetría y gravimetría; en cada caso se toma en cuenta la intensidad de color por medio de absorción óptica, volumen de titración o

titulación, o la ganancia o pérdida de peso. Suelen ser técnicas muy exactas y sensibles a muchos elementos químicos, pero implican relativamente mucho trabajo (Ostrooumov, 2009).

Separación de cationes

También conocida como marcha de cationes o análisis de cationes. Esta técnica ayuda a la separación de 24 cationes, o combinación de ellos en solución. La separación se hace en cinco grupos, que al usar reactivos químicos precipitan selectivamente a ciertos iones en ciertas condiciones de temperatura y concentración. La Tabla 1 muestra los cationes para cada grupo (Nordmann, 1979).

Tabla 1. Elementos químicos ubicados por grupos de cationes.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
AgCl	HgS	NiS	BaCO₃	Mg⁺²
Hg₂Cl₂	PbS	CoS	CaCO₃	Na⁺
PbCl₂	Bi₂S₃	FeS, Fe(OH)₃	SrCO₃	K⁺
	CuS	MnS		NH₄⁺
	CdS	Al(OH)₃		
	As₂S₃	Cr(OH)₃		
	Sb₂S₃	ZnS		
	SnS			

Un ejemplo de este análisis es un trabajo en donde se identificó la presencia de Na, Cu, Sb, Ba, Ca y K en las cenizas del duramen de *Platymiscium*

lasiocarpum, mientras que en las cenizas del duramen de *Dalberia granadillo* se encontró Na, Cu, Sn, Sb, Ba, Sr y Ca (Rutiaga-Quiñones, 1991).

Separación de aniones

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 (Tabla 2) (Nordmann, 1979).

Tabla 2. Elementos químicos ubicados por grupos de aniones.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
NO_2^-	PO_4^{3-}	Cl^-	NO_3^-
S^{2-}	SO_4^{2-}	Br^-	$\text{H}_3\text{C-CO}_2^-$
SO_3^{2-}	CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	I^-	
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	BO_2^- , BO_3^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$	SCN^-	
CO_3^{2-}	F^-	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	
	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$		

Algunos experimentos especiales

a) Perlas de bórax. Cuando se calienta un poco de bórax, que ha sido pegado a un alambre de platino hasta que se funde, y se toma una muestra a analizar llevándola a las dos zonas de una flama, oxidante y reductora. Así, los

metales reaccionan y producen coloración típica que corresponden a sus estados de oxidación.

b) Pruebas a la flama. Estos experimentos ayudan a identificar la presencia de Cu^{+2} , Sn^{+2} , Ca^{+2} , Sr^{+2} , Ba^{+2} , Na^+ , Li^+ , K^+ y BO_2^- . Suele usarse también alambre de platino como en el caso de perlas de bórax. El uso del espectroscopio ayuda a realizar observaciones más precisas en estas pruebas a la flama.

c) Fluorescencia. El boro y aluminio pueden detectarse al examinar la muestra con luz ultravioleta. Algunos minerales, al ser excitados por luz ultravioleta, emiten luz y se pueden diferenciar; son fluorescentes si emiten luz al estar expuestos a la radiación, y son fosforescentes cuando siguen emitiendo luz al concluir con la radiación.

d) Uso de ditizona. La ditizona, defenil-tiocarbazona, es útil para la identificación de Ag, Au, Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, In, Mn, Ni, Pb, Pd, Pt, Sn, Tl y Zn.

e) Microscopía. La identificación de Ca^{+2} y Sr^{+2} , aunque se confunden con frecuencia por su similitud química, es un ejemplo del uso de la microscopía para el estudio de la estructura cristalina (Nordmann, 1979).

Para profundizar más sobre la metodología del análisis de iones se recomienda revisar las obras de Ayres (1970), Aràneo (1972), Nordmann

(1979), Luna-Rangel (1982), Brumblay (1983) y Holkova (1986), y por supuesto algunas otras relativas al tema.

Se estima que antes de los años 50's los análisis de las sustancias minerales se llevaban a cabo mediante las técnicas de química húmeda, que como ya se mencionó, y las muestras a analizar deberían estar en disolución. Una vez disueltas se aplicaba la separación de cationes y de aniones. También haciendo uso de varias técnicas, como la valoración, destilación, espectrometría, lecturas de pH y con electrodos, además apoyándose en las técnicas de colorimetría, volumetría y gravimetría. Posteriormente, se han venido utilizando análisis que emplean varias técnicas instrumentales, en donde cada una tiene su propia metodología de preparación de muestras, conocidas también como técnicas analíticas emergentes (Padilla-Cuevas et al., 2020).

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).

Las bases sistemáticas de los principios de las técnicas instrumentales modernas son las siguientes (Ostrooumov, 2009):

Métodos basados en la interacción de la materia con las radiaciones o partículas (métodos analíticos y estructurales).

Métodos que se basan en los diferentes efectos de la acción con la materia (mecánicos, eléctricos, magnéticos, ópticos y térmicos).

Dentro de los métodos físicos, basados en la interacción de la materia con la radiación, pueden clasificarse en dependencia de dos características combinadas, a saber, la clase de radiación y el modo de interacción; en la primera se trata de energía de radiación o región del espectro electromagnético (Nuclear, Rayos X, Visible, Infrarrojo, Microondas, Frecuencia Superalta y Radiofrecuencia); en el segundo comprende la Espectroscopía, Microscopía y Difractometría, además de Microsonda, que involucra dos o tres de estos modos de interacción.

Por último, los métodos basados en los modos de interacción de la radiación con la materia, así, la espectroscopía involucra Radiación Nuclear, Rayos X, Óptica, Infrarrojo, Superalta Frecuencia y Radiofrecuencia; la Microscopía, los anteriores a excepción de Superalta Frecuencia y Radiofrecuencia; y la Difractometría, involucra solamente Radiación Nuclear y Rayos X.

Ostrooumov (2009) reporta las técnicas analíticas contemporáneas, distribuidas de la siguiente manera: Espectroscópicas (26 Nuclear, 12 Rayos X, 10 Electrones, 11 Ópticas, 16 Infrarrojo y Raman, 2 Microondas, 11 Frecuencia Superalta y 5 Radiofrecuencia), Microscópicas (12 Nuclear,

2 Rayos X, 9 Electrónica, 3 Óptica y 1 Acústica), 21 Difractometría (Neutrones, Rayos X y Electrones), 12 Análisis Químicos y 7 Microsonda Electrónica. Estas técnicas se basan en principios diferentes, pero su objetivo es producir una señal medible y relacionada con la concentración de los constituyentes de una muestra.

De muchas técnicas analíticas existentes para estudiar y caracterizar las sustancias minerales, las más utilizadas actualmente son las siguientes (Ostrooumov, 2009):

Análisis químicos: Análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF, por sus siglas en inglés), Método de Microsonda Electrónica (EPMA, por sus siglas en inglés), Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, por sus siglas en inglés), Emisión de Rayos X Inducida por Protones (PIXE, por sus siglas en inglés), Espectrometría de Plasma Inducido por Láser (LIBS, por sus siglas en inglés), Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS, por sus siglas en inglés:).

Análisis Cristaloquímico: Difracción de Rayos X. Técnicas Espectroscópicas: Espectroscopia Óptica, Raman e Infrarroja. Microscopia Electrónica de Barrido y Transmisión.

Otras técnicas, como: Efecto Mössbauer (γ -espectroscopía), Resonancia Magnético Nuclear (RMN, por sus siglas en inglés), Resonancia Paramagnética Electrónica (RPE, por sus siglas en inglés), Espectroscopía de Absorción Extendida de Rayos X (EXAFS, por sus siglas en inglés), Espectroscopía de Borde de Absorción de rayos X (XANES, por sus siglas

en inglés), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM, por sus siglas en inglés), Luminiscencia, Análisis Térmico y Análisis Termobarométrico.

Ahora bien, hay técnicas en las cuales se requiere que la muestra sea solubilizada, por ejemplo, ICP, ICP-MS, Espectrometría de Emisión Atómica (AES, por sus siglas en inglés) y AAS. Dentro de las técnicas que no son destructivas se encuentran la Espectrometría de Fotoemisión de Rayos X (XPS, X por sus siglas en inglés), PIXE, XRF y Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) (Padilla-Cuevas et al., 2020).

En las siguientes líneas se mencionarán algunas técnicas usadas en el análisis de sustancias inorgánicas procedentes de materiales lignocelulósicos, y se darán algunos ejemplos.

Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)

Suele llamarse también Análisis de Absorción Atómica (AAA, por sus siglas en inglés). Mediante esta técnica se pueden determinar los elementos químicos siguientes: Ag, Bi, Cd, Co, Hg, Mo, Ni, Pb, Pt, Sb, Se, Sn, Te y Zn, entre otros. La muestra para analizar deberá estar en solución, que en forma de aerosol se introduce en la llama del soplete del equipo con monocromador óptico, la cual se encuentra en la trayectoria de los rayos de la fuente estándar de luz; atomización de la solución en la llama. En este proceso, la absorción de la emisión que es proporcional al contenido del elemento químico a buscar se registra por un fotomultiplicador, se amplifica y finalmente se registra (Ostrooumov, 2009).

Un ejemplo de la aplicación de esta técnica, es la detección de Cu, Zn, Fe, Mg y Ca, en maderas de *Arbutus xalapensis*, *Juniperus deppeana* y *Quercus sideroxyla* (Quiñones-Reveles et al., 2021).

Espectroscopía de Emisión Atómica (AES)

Este método de análisis químico se basa en el uso de la intensidad de la luz emitida, ya sea por una llama, un plasma, un arco o una chispa eléctricos, en una longitud de onda particular para conocer o determinar la cantidad de un elemento químico en la muestra. La identidad del elemento se determina por la longitud de onda característica de la línea espectral atómica y por su parte, la intensidad de la luz que se emite es proporcional a la cantidad de átomos del elemento en cuestión (Uden, 1992).

Tanto en la técnica de AAS como en la de AES, la muestra debe ser atomizada y así producir un espectro para el análisis. La diferencia entre AAS y AES, es que en AES la muestra a analizar recibe calor suficiente para la excitación de sus átomos para alcanzar niveles de energía superiores y al volver al estado fundamental se mide la radiación. Por su parte, la AAS mide la cantidad de la radiación incidente absorbida. En cuanto a la fuente de radiación, en la AES son los átomos o los iones de la muestra que son excitados, mientras que, en la AAS, se trata de una fuente externa; lámpara de cátodo hueco. Para ambas técnicas, la instrumentación es similar (la diferencia en la fuente de radiación), y se conoce que muchos instrumentos pueden trabajar, tanto en modo de absorción, como en modo de emisión (Uden, 1992).

Espectrometría de Emisión de Llama (FAES)

En esta técnica, la muestra es excitada en un sistema nebulizador quemador, semejante para AAS, colocada en la llama mediante un bucle de alambre, por lo general de platino. El calor evapora el solvente y se rompen los enlaces químicos, creando átomos libres. Además, los electrones se excitan a estados de mayor energía y al volver a su estado fundamental, emiten luz de longitud de onda que es característica para cada elemento químico, y es dispersada en un prisma y detectada en el equipo. Esta técnica utiliza temperatura de llama bajas y es útil para la detección de elementos cuyas energías de excitación son relativamente bajas, como los metales alcalinos o alcalinotérreos.

Como ejemplo de esta técnica, es la detección de K, Ca y Na en ceniza de madera de *Pinus sylvestris* L. (Rolka et al., 2023).

Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Esta técnica utiliza plasma acoplado inductivamente para producir electrones excitados en la muestra a analizar y iones que emiten una radiación electromagnética en ciertas longitudes de onda que son características para un elemento en particular. Con esta técnica se puede determinar Na, K, P, Ca y Mg, como elementos mayoritarios, además de Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, V, Ti, Al, Sr y Ba, como trazas, en materiales biológicos y de suelos (Dahlquist et al., 1978).

Espectroscopía de Emisión Atómica de Chispa y Arco

Esta técnica es usada para en análisis de metales en muestras sólidas y para los materiales no conductores es necesario molerlos con grafito en polvo para volverlos conductores. La chispa eléctrica de alto voltaje o el arco eléctrico, de corriente continua o alterna, pasa a través de la muestra y la calienta a alta temperatura para lograr la excitación de los electrones presentes en la muestra. Una vez excitados, los electrones emiten luz en longitudes de onda características, que se pueden dispersar con un monocromador y luego se detectan. Esta técnica es útil para determinar cuantitativamente la composición química de los minerales (Ostrooumov, 2009; Harvey, 2023).

Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)

Su fundamento está en la conjugación de dos principios básicos: ionización en el plasma y detección de los iones en un espectrómetro de masas. Las altas temperaturas (6000 a 10000 K) logradas en el plasma permiten la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, lo que produce un ion con carga positiva y un electrón (Ostrooumov, 2009). Brevemente, la muestra solubilizada se transporta por el gas acarreador (Ar) hasta el sistema nebulizador, donde se transforma en aerosol. Éste se conduce a la zona de ionización generada al someter el flujo de Ar, a el efecto de un campo magnético oscilante que forma el plasma. Los iones generados van al filtro cuadrupolo y son separados por su relación masa/carga, llegando a un detector donde se calcula su abundancia (Padilla-Cuevas et al., 2020).

Con este método se pueden analizar más de 75 elementos ionizables y tiene aplicación en el análisis de plantas y tejido animal, medicamentos, alimentos, material geológico y muestras ambientales (Ostrooumov, 2009).

Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)

Este método espectral muy preciso (ICP-AES, por sus siglas en inglés) es usado para el análisis multielemental y también permite la detección de no metales como el Cl, Br, I y S. Su funcionamiento es con un plasma de alta energía de un gas inerte (Ar) y en éste se inyecta la muestra líquida atomizada. La muestra es ionizada en el plasma y los iones emiten luz a diferentes longitudes de onda característica, que luego se miden; la intensidad de la señal del espectro es indicativa de la concentración de los elementos presentes en la muestra. Brevemente, se trata de una digestión de la muestra en ácido nítrico concentrado durante cierto tiempo, después una alícuota se diluye en agua nanopura, y así, queda lista la muestra para su análisis. La aplicación de esta técnica es en alimentos y bebidas, geología, farmacia, metales y plantas (Raja y Barron, 2023).

Un ejemplo de la utilización de esta técnica, en un trabajo donde se detectaron 22 elementos químicos presentes en 32 diferentes biomásas lignocelulósicas analizadas: Al, As, B, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr, V y Zn, pero no todos estos elementos fueron encontrados en todas las muestras. Los resultados obtenidos indican en rango de concentración de los elementos detectados, como sigue. Para las

maderas tropicales: *Swartzia cubensis*, 1.43 ppm de Mo a 222886 ppm de K; *Lysiloma latisiliquum*, 0.89 ppm de Cr a 187808 ppm de K; *Caesalpinia platyloba*, 0.92 ppm de V a 228498 ppm de K; *Manilkara zapota*, 1.93 ppm de V a 201690 ppm de K; *Swietenia macrophylla*, 9.51 ppm de Cr a 158314 ppm de K. Para el caso de las maderas de pino, los resultados van de 0.01 ppm de As a 385963 ppm de K, mientras que en madera de encinos varían de 0.53 ppm de V a 378271 ppm de K. Para ramas de cítricos: ramas de lima Persa, 17.66 ppm de Li a 281157 ppm de K; ramas de naranjo, 1.64 ppm de Cr a 235380 ppm de K. Para hojas de lima Persa, 0.22 ppm de Cr a 259108 ppm de K. Para cáscara de limón, 1.03 ppm de Co a 282617 ppm de K. En todos los casos, los elementos de mayor concentración fueron el K y Ca (Rutiaga-Quiñones et al., 2020).

Otro ejemplo de aplicación de esta misma técnica es un estudio realizado con aserrín y viruta de pino donde se detectó la presencia de 20 elementos químicos, cuyos valores de mayor concentración fueron K (8301.61 a 96001.30 ppm), Ca (2671.08 a 24,350.40 ppm), Al (4770.21 a 22,787.87 ppm) y Mg (819.25 a 8714.68 ppm) (Morales-Máximo et al., 2021).

En otro trabajo, reportan la identificación de los siguientes elementos químicos en biomasa de podas de árboles de guayaba: P (15744.31 ppm), K (13373.68 ppm), Ca (4610.61 ppm), Na (1897.53 ppm), Mg (1391.37 ppm), Si (467.15 ppm), Ba (412.30 ppm), Sr (353.34 ppm), Mn (339.37 ppm), Al (191.30 ppm), B (188.23 ppm), Fe (174.40 ppm), Zn (138.86

ppm), Li (124.98 ppm), Cu (113.70 ppm), Ni (6.89 ppm), Sn (1.18 ppm) y V (0.53 ppm) (Ruiz-García et al., 2022).

Otra investigación con biomasa de residuos de poda de árboles de aguacate da a conocer la presencia de elementos químicos en ramas con diámetros mayores a 2.5 cm, con el siguiente comportamiento de mayor a menor concentración: P>K>Ca>Fe, mientras que en ramas con diámetros menores a 2.5 cm incluidas hojas, el resultado fue el siguiente: K>P>Fe>Ca (Soria-González et al., 2022).

Espectrometría de Fotoemisión de Rayos X (XPS)

Esta técnica es de análisis superficial, ya que la penetración de los fotones en la muestra no supera 2 nm; es multielemental, cualitativa y cuantitativa, pero no incluye al hidrógeno. No es destructiva y es semicuantitativa y cuantitativa; la sensibilidad depende de la concentración del elemento y de la pureza de la matriz. La medición con esta técnica requiere de ultra alto vacío (inferiores a 10^{-7} pascales o 100 nanopascales. Tiene aplicaciones en metalurgia, corrosión, catálisis heterogénea, polímeros y adhesivos, caracterización de superficies, pero existe poca información de estudios para detectar sustancias inorgánicas en materiales vegetales (Padilla-Cuevas et al., 2020).

Análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF)

En esta técnica, de análisis de superficie y no destructiva, adecuada para análisis multielemental cualitativo y cuantitativo en vegetales, la muestra se usa en forma de pastilla. Los rayos X (radiación primaria) inciden sobre

los electrones internos de los átomos de la muestra deslocalizando un electrón de las capas internas, luego otro electrón de un nivel más externo llega al lugar de la vacante y emite un fotón de rayos X (radiación secundaria), cuyo espectro es característico para cada elemento. Con esta técnica se pueden hacer microanálisis y mapeos de los elementos, y es posible analizar también películas, fibras, polvos, trozos de material, líquidos y sólidos en suspensión. Se puede llevar a cabo la determinación de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mg, C, Mn, Na, K y P) en forma de óxidos (Ostrooumov, 2009; Padilla-Cuevas et al., 2020).

Espectrometría de Emisión de Rayos X Inducida por Partículas (PIXE)

También esta es una técnica de superficie, no destructiva y utilizada para el análisis multielemental total y no requiere atomización. Se fundamenta en la detección de los rayos X emitidos al momento que un haz de partículas cargadas, interaccionan con los electrones de los átomos de la muestra. Cuando los electrones de las capas internas se expulsan, el exceso de energía de los átomos se libera mediante la emisión de rayos X, característica particular para cada elemento. Con esta técnica se analizan con mayor exactitud elementos químicos con número atómico entre 18 y 40, y tiene el potencial para conocer la distribución de los elementos químicos en distintos materiales y también para vegetales (Padilla-Cuevas et al., 2020).

Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX)

Esta es una técnica de superficie, no destructiva, también conocida como EDS (por sus siglas en inglés). Su fundamento es la energía dispersiva de rayos X. Los equipos de XRF se acoplan a microscopios Electrónicos de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés,) o de Transmisión (TEM, por sus siglas en inglés), o bien, una combinación de ambos Microscopios (STEM, por sus siglas en inglés). Estas técnicas se incluyen dentro de la Microscopia de Fluorescencia de Rayos X (XFM, sus siglas en inglés,). Con esta técnica se obtiene información de la abundancia relativa de los elementos químicos con número atómico mayor al 11 (Na), pero se requiere un potencial de 10 a 40 KeV para medir elementos químicos con número atómico de 40 a 80 (Padilla-Cuevas et al., 2020).

Algunos ejemplos de investigaciones que emplearon esta técnica para el análisis de las cenizas de diferentes tipos de biomasa se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Elementos químicos detectados en diferentes biomásas mediante EDX.

Material		Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn
¹ <i>Alnus acuminata</i>	Madera	x	x	x					x	x	x	x	x	x
² <i>Quercus macdougalii</i>	Duramen	x	x	x	x	x	x		x	x	x			
	Albura	x	x		x	x	x		x	x	x			
³ <i>Eichhornia crassipes</i>	Pulpa Kraft café	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

⁴ <i>Eichhornia crassipes</i>	Tallo	x	x		x	x	x	x	x	x				
⁵ <i>Agave durangensis</i>	Bagazo	x	x	x	x	x	x		x	x				
⁶ <i>Abies</i> spp. <i>Pinus</i> spp.	Aserrín		x	x	x	x	x		x	x	x			
	Aserrín		x	x	x	x	x		x	x	x	x		

¹Ruiz-Aquino et al. (2019), ² Ruíz-Aquino et al. (2020), ³Pintor-Ibarra et al. (2020), ⁴Pintor-Ibarra et al. (2018), ⁵Moreno-Anguiano et al. (2021), ⁶Marínez-Gómez et al. (2022).

Métodos Cromatográficos

Además de los métodos o técnicas vistas anteriormente, existen también los métodos cromatográficos, que son útiles para separar compuestos orgánicos, pero también sustancias inorgánicas (Schwedt 1994). La cromatografía es un método de separación de uno o varios componentes de una muestra, donde se involucran dos fases, fase fija y fase móvil; la separación se puede hacer en columna, en placa y en papel. Cuando las separaciones inorgánicas en los minerales son difíciles, la cromatografía puede ser apta, por ejemplo, la separación de Pt de los platinoides; el Be del Al; el Sc de otras tierras raras, el Hf del Zr; el Se del Te (Aráneo, 1972). La cromatografía en papel sirve para separar los cationes del grupo 1, 2, 3, 4 y 5, además para separar los aniones F, Cl, Br, I, PO_4^{3-} , NPO_3^{2-} y H_2PO_4^- (Smith y Feinberg, 1979).

También existe la cromatografía iónica o de intercambio iónico, con la cual se pueden separar iones o moléculas polares, y se basa en las propiedades

de carga de las moléculas. Un ejemplo de aplicación de la cromatografía iónica, es que se han identificado en muestras de maíz los cationes K^+ , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} y NH_4^+ , además de los aniones Cl^- , PO_4^{-3} y NO_3^- (Chen et al., 2007).

Influencia de los Elementos Químicos en la Combustión

Como ya se ha mencionado, en las maderas de clima templado el contenido de cenizas es alrededor de 1.0% y en las especies tropicales suele ser poco mayor (Fengel y Wegener, 1983). En hojas, ramas y corteza la cantidad de sustancias minerales es mayor que en madera (Fengel y Wegener, 1983; Herrera-Fernández, 2013; Herrera-Fernández et al., 2013; Cárdenas-Gutiérrez et al., 2018). En otras plantas herbáceas los valores son mayores. Por ejemplo, en *Eichhornia crassipes* se han reportado los siguientes valores: 19.02% en raíz, 20.78% en tallo, 14.37% en hojas y 19.37% en la planta completa (Pintor-Ibarra et al., 2018). Otro ejemplo es el caso de bagazo de *Agave durangensis* (12.65%), fruto de *Luffa aegyptiaca* (5.3%), en *Pennisetum* sp. (12.11% en tallo, 13.58% en hojas y 13.03% en planta completa) (Moreno-Anguiano et al., 2021).

Es decir, aun cuando el contenido de ceniza es relativamente bajo, en comparación con las macromoléculas de la pared celular, no se debe subestimar, y aun menos los constituyentes químicos presentes en la ceniza, residuo que queda después del proceso de combustión. Las sustancias minerales pueden absorber calor y humedad (Bridgeman et al., 2008), lo que influye en el poder calorífico, además de que altos contenido de cenizas

también afectan negativamente la eficiencia y el proceso de la combustión (Fengel y Wegener, 1983; Bhatt y Todaria, 1992; Obernberger y Thek, 2010).

El sílice, azufre y metales alcalinos presentes en la ceniza son una desventaja en el proceso de combustión, porque pueden formar silicatos alcalinos o sulfatos, que a 700 °C se funden o ablandan (Shankar-Tumuluru et al., 2012). El cloro y azufre forman depósitos y provocan corrosión, además, el primero produce HCl y el segundo emisiones de SO_x. En los aerosoles están presentes los elementos volátiles, como el Na y K. Los elementos Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si y Ti son de gran importancia en el punto de fusión de la ceniza y además forman depósitos y corrosión. Por su parte, As, Cd, Hg, Pb y Zn, son relevantes en la emisión de gases y de aerosoles, así como en la formación de depósitos y corrosión. También los elementos Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Mn y V, también juegan un rol importante (Obernberger y Thek, 2004; Obernberger et al., 2006).

A parte de que el Ca reduce la cantidad de cenizas en los equipos de combustión, ayuda a incrementar el punto de fusión y el Mg, en grandes cantidades, favorece igualmente el punto de fusión. El P como elemento semivolátil, puede ocasionar problemas de fusión de la ceniza al formar fosfatos (Obernberger y Thek (2010). Por su parte, el K en altas concentraciones disminuye el punto de fusión, lo que repercute en el proceso de combustión, por la generación de escoria y formación de depósitos duros en los equipos, además de la formación de aerosoles y

presentar emisiones de partículas finas (Oberberger y Thek, 2004; Van Lith et al., 2006). En cuanto al Na, cuando está presente en altas cantidades, reduce el punto de fusión de la ceniza (Oberberger y Thek, 2010), hay favorece la formación de depósitos al condensar los vapores al interior de la tubería en el equipo de combustión (Werkelin et al., 2011).

Conclusiones

Aun cuando en general el contenido de ceniza en los materiales lignocelulósicos usados para procesos de combustión pudiera ser relativamente bajo, es de suma importancia tomarlo en cuenta y más aún sus constituyentes químicos. Estas sustancias pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas o bien por sus hojas. Tanto en maderas de coníferas, como en latifoliadas es común encontrar los siguientes elementos químicos: N, S, Cl, F, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn, aunque también es posible detectar en vegetales superiores Li, Rb, Pu, incluso tierras raras. Existen muchos métodos o técnicas para averiguar la presencia de estas sustancias minerales, desde el análisis químico húmedo hasta el análisis instrumental. Algunas técnicas instrumentales requerirán, de que la muestra a analizar sea solubilizada, otras no. Finalmente, el uso de una técnica u otra dependerá del objetivo del análisis y de la disponibilidad de un equipo u otro.

Referencias.

- Aràneo, A. (1972). *Química Analítica Cualitativa*. McGraw-Hill.
- 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.
- Cárdenas-Gutiérrez, M. Á., Correa-Méndez, F., Pedraza-Bucio, F. E., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. and Rutiaga-Quñones, J. G. (2018). Chemical components of the branches of six hardwood species. *Wood Research*, 63(5), 795-808.
- 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.
- de Lucas Herguedas, A. I., del Peso Taranco, C., Rodríguez García E., Prieto Paniagua, P., Sanz González, E. y Sánchez Martín, M. (2012). Biomasa, Biocombustibles y Sustentabilidad. ITAGRA.CT. y IUGFS. Palencia, España.

- El-Sayed, M. A. and El-Samni, T. M. (2006). Physical and Chemical Properties of Rice Straw Ash and Its Effect on the Cement Paste Produced from Different Cement Types. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 19(1), 21-29.
- Fengel, D. and Wegener, G. (1983). *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter & Co.
- Harvey, D. (2023). *Instrumental Analysis*. DePauw University. LibreTexts.
- Herrera-Fernández, A.C. (2013). Determinación de la densidad en madera, poder calorífico y composición química en corteza y madera de seis especies de Latifoliadas. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.
- Herrera-Fernández, A.C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F.E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. y Rutiaga-Quiñones, J.G. (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encinos (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, 72, 136-154.
- Holkova, L. (1986). *Química Analítica Cuantitativa*. 2ª edición. Trillas.
- Ince, P. J. (1979). How to Estimate Recoverable Heat Energy in Wood or Bark Fuels. For. Prod. Lab. Gen. Tech. Report FPL 29, USDA.
- Kollmann, F. (1981). Holz zur Energieerzeugung - gestern, heute, morgen. *Holz Zentralbl.*, 107(9), 319-320.
- Kramer, P. J. and Kozlowski, T. T. (1979). *Physiology of Woody Plants*. Academic Press.
- Lee-Carter, C. (2012). Physicochemical properties and thermal decomposition of torrefied woody biomass and energy crop. MS Thesis. Faculty of Auburn University. Auburn, AL, USA.

- Luna-Rangel, R. (1982). *Fundamentos de Química Analítica*. Vol. 2. 2ª reimpresión. LIMUSA. México.
- Martínez-Gómez, O., Pintor-Ibarra, L. F., Rutiaga-Quiñones, J. G. and Corona-Terán, J. (2022). Chemical Composition and Energy Evaluation of *Abies* spp. and *Pinus* spp. Sawdust Collected as a Byproduct of the Primary Wood Sawing. *South-east Eur for*, 13(2), 89-96.
- Mohan, D., Pittman, C. U. and Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B. and 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, 977.
- Moreno-Anguiano, O., Carrillo-Parra, A, Rutiaga-Quiñones, J. G., Wehenkel, Ch., Pompa-García, M., Márquez-Montesino, F. and Pintor-Ibarra, L. F. (2021). Chemical composition of *Luffa aegyptiaca* Mill., *Agave durangensis* Gentry and *Pennisetum* sp. *PeerJ*, 9, e10626.
- 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.
- Navarro-Blaya, S. y Navarro-García, G. (2003). *Química agrícola*. 2ª edición. Ediciones Mundi-Prensa.
- Nordmann, J. (1979). *Análisis Cualitativo y Química Inorgánica*. 13ª impresión. CECSA.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669.

- Obernberger, I. and Thek, G. (2010). *The pellet handbook*. 1st ed. London-Washington DC: Earthscan.
- Obernberger, I., Brunner, T. and Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30, 973–982.
- 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.
- Pintor-Ibarra, L. F., Rivera-Prado, J. J., Ngangyo-Heya, M., and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018) Evaluation of the chemical components of *Eichhornia crassipes* as an alternative raw material for pulp and paper. *BioResources*, 13(2), 2800-2813.
- Pintor-Ibarra, L. F., Rivera-Prado, J. J., Ramos-Vargas, S., Escoto-García, T., Rodríguez-Olalde, N. E. and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020) Kraft pulping and bleaching of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Water hyacinth). *BioResources*, 15(4), 9243-9264.
- Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M. and Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of Pellets from Three Forest Species: From Raw Material to End Use. *Forest*, 12, 447.

- 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., Zołnowski, A. C., Wyszowski, 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.
- Ruiz-Aquino, F., Luna Bautista, L., Luna Bautista, A. E., Santiago-García, W., Pintor-Ibarra, L. F. and Rutiaga-Quiñones J. G. (2020). Anatomical Characterization, Physical, and Chemical Properties of Wood of *Quercus macdougalii* Martínez, Endemic Species of the Sierra Juárez of Oaxaca, Mexico. *BioResources*, 15(3), 5975-5998.
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W. and Rutiaga-Quiñones. (2019). Wood Chemical Composition of Five Tree Species from Oaxaca, Mexico. *BioResources*, 14(4), 9826-9839.
- Ruiz-García, V. M., Huerta-Mendez, M. Y., Vázquez-Tinoco, J. C., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., López-Albarrán, P., Masera, O. and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Pellets from Lignocellulosic Material Obtained from Pruning Guava Trees: Characterization, Energy Performance and Emissions. *Sustainability*, 14, 1336.
- Rutiaga-Quiñones, J. G. (1991). Determinación de la composición química de la madera de dos especies tropicales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.
- 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., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J. and Luján-Álvarez, C. (2020).

- Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources*, 15(4), 8529-8553.
- Shankar-Tumuluru, J., Boardman, R. D., Wright, C. T. and Hess, J. R. (2012). Some chemical compositional changes in Miscanthus and white oak sawdust samples during torrefaction. *Energies*, 5(10), 3928-3947.
- Schwedt, G. (1994). *Cromatographische Trennmethoden*. 3. Erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag.
- Smith, I. y Feinberg, J. G. (1979). *Cromatografía sobre papel y capa fina*. Electroforesis. Editorial Alhambra.
- Soria-González, J. A., Tauro, R., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M. and Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Avocado Tree Pruning Pellets (*Persea americana* Mill.) for Energy Purposes: Characterization and Quality Evaluation. *Energies*, 15, 7514.
- Uden, P. C. (1992). *Elemento específico cromatográfico detección por espectrometría de emisión atómica*. Columbus, OH: Sociedad Americana de Química.
- UNE-EN 14961-1. (2011). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. AENOR. Madrid, España.
- Van Lith, S. C., Alonso, V., Jensen, P. A., Frandsen, F. J. and Glarborg, P. (2006). Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. Part 1: Development and evaluation of quantification methods. *Energy & Fuels*, 20(3), 964–978.
- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la Biomasa Para Uso Energético*, 2nd ed.; Editorial Reverté, Universitat Politècnica de València.

Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B. J. and Hupa, M. (2011). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy*, 35, 725–733.

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, Luis Fernando Pintor-Ibarra¹ y Francisco Márquez Montesino⁴

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.*

⁴ *Universidad de Pinar del Río, Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Sostenibles, Calle Martí Final No. 270, Ciudad de Pinar del Río, Cuba.*

**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. En este sentido es altamente benéfico conocer los mecanismos y/o procesos de transformación en estos materiales, especialmente los de carácter térmico. Uno de ellos es la

pirólisis, que es el primer paso en gasificación y combustión, resultando productos de importancia energética y que son total o parcialmente oxidados, tales como metano, hidrógeno e incluso el bio-oil (derivado del aprovechamiento de algunas semillas). Debido a que el análisis TGA, 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 y su cinética de reacción asociada, es posible la aplicación de ecuaciones cinéticas que determinan las condiciones del proceso como temperaturas, cantidades y concentraciones de reactivos para un aprovechamiento industrial optimizado de productos lignocelulósicos. Una función paralela y complementaria del TGA, consiste en utilizar la primera derivada (DTG) con respecto a la temperatura y/o tiempo. A través del tratamiento de los datos resultantes, es posible el cálculo de los principales parámetros cinéticos y termodinámicos de la biomasa en diversas condiciones de trabajo de acuerdo a los programas de calentamiento que generalmente se diferencian con cambios térmicos (iso-térmicos) ó con temperatura variable (no iso-térmicos), es decir, programa escalonado con tiempos de espera e incluso con cambio en la atmósfera a diversos intervalos de tiempo.

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

Introducción

El análisis termogravimétrico conocido como TGA, por sus siglas en inglés, 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. Por lo general, el material sujeto a estudio debe calentarse bajo un programa bien establecido, donde la velocidad de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) puede mantenerse constante o no según los requerimientos del análisis. Tal velocidad de calentamiento puede variar desde $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta $200^{\circ}\text{C}/\text{min}$. En caso de que sea constante, se denomina como proceso dinámico. Otra variante es la temperatura, en caso de que se trabaje tal parámetro de manera constante, se considera que el proceso es isotérmico. Cuando los procesos son controlados específicamente por la muestra, se pueden seguir variaciones de temperaturas derivando diversas rampas de calentamiento y tiempos de espera, todo dependerá del tipo de información que se quiera obtener de la muestra en cuestión.

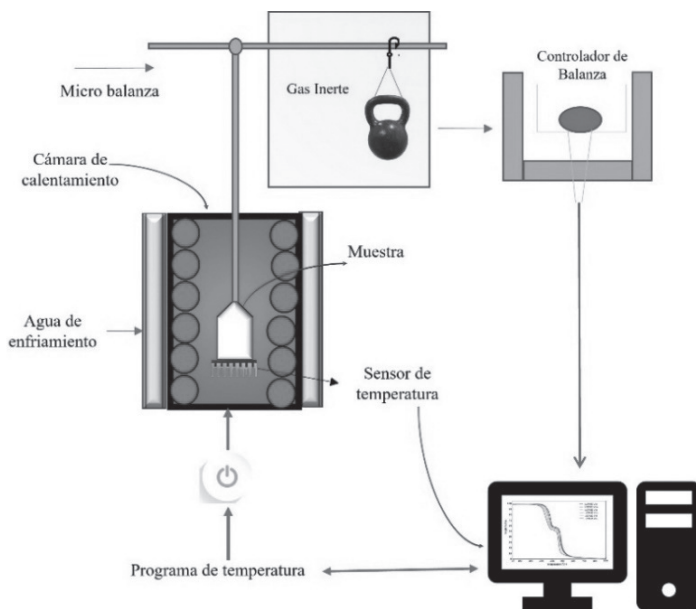


Figura 1. Diagrama general de un analizador termogravimétrico (*elaboración propia*).

Otro aspecto importante es el gas que se utilice en el experimento, el cual puede tener un carácter oxidante, reactivo o inerte. En estudios de pirólisis de biomasa, generalmente se requiere de una atmósfera inerte, los gases más comunes son nitrógeno, argón y helio. La importancia de que sea inerte se debe a que es necesario evitar que haya alguna reacción entre los reactivos, es decir, entre los constituyentes de la muestra y atmósfera. De no ser así, es difícil lograr el objetivo que es el análisis de alguna propiedad en función del tiempo o temperatura. Si se requiere, también se pueden realizar cambios de un gas a otro durante el experimento, por ejemplo, se puede cambiar en determinado tiempo y temperatura, de nitrógeno a

oxígeno y viceversa. Las velocidades de flujo gaseoso (cm^3/min , mmHg, etc) también son importantes. Otro detalle son las temperaturas de trabajo de los equipos de TGA, dependiendo del material de fabricación del horno como el platino, rodio y wolframio que permiten temperaturas de calentamiento de 1400, 1800 y 2800°C respectivamente. Claro está que, con la finalidad de proteger las resistencias eléctricas, termopares y la propia balanza o en realidad microbalanza de cualquier equipo de TGA, se debe evitar someterlos a las máximas temperaturas mencionadas, por lo general es conveniente restar entre 100-200°C, es decir las temperaturas reales no deben rebasar los rangos de 1200-1300°C, 1600-1700°C y 2600-2700°C para el platino, rodio y wolframio respectivamente (Devitte *et al.*, 2021).

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). Esta gráfica es la primera que se obtiene. Generalmente es necesario analizar la velocidad con la que cambia tal pérdida de masa respecto al tiempo y/o temperatura, este es un análisis termogravimétrico diferencial o DTG que consiste en el cálculo de la derivada de acuerdo con los parámetros mencionados, es decir, tiempo y/o temperatura. Para visualizar todo el proceso TGA-DTG, ambos se grafican, considerando el DTG como un segundo eje vertical (derecho), aunque esto no es definitivo, también es válido mostrar ambas gráficas separadas. Al finalizar el experimento, pueden resultar varios miles de datos. Para

optimizar el cálculo del DTG, recomienda hacer el cálculo de las derivadas hacia adelante en el primer punto, hacia atrás en el último y en el resto la centrada, o incluso aproximaciones a la derivada de orden superior. Como el número de datos experimentales es muy elevado se produce algo llamado “ruido” en la gráfica, sobre todo en el DTG, por lo tanto, es posible hacer algunas reducciones tanto en el blanco del equipo como en la muestra.

Debido a la necesidad de erradicar el uso de los combustibles fósiles, sobre todo para fines energéticos, y su impacto negativo hacia el medio ambiente, las investigaciones actuales se han dirigido hacia la optimización de los recursos naturales, como la biomasa y más específicamente los residuos agroforestales derivados del aprovechamiento primario. Derivado de la degradación termoquímica, tal optimización 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, el cual puede funcionar como vector energético para la sustitución parcial e incluso total del petróleo y que coadyube a la generación de energía eléctrica a través de dispositivos de última tecnología como lo son las celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC) o de intercambio polimérico (PEMC). En este capítulo se abordan de forma general algunos conceptos básicos de la técnica de análisis termogravimétrico, así como la manera en que puede apoyar a la optimización energética de residuos de biomasa mediante la aplicación de modelos matemáticos diferenciales e integrales bien conocidos y presentados en las más recientes publicaciones de revistas de alto factor de impacto, que tratan sobre cinética de procesos

termogravimétricos en biomasa lignocelulósica terrestre y/o marina (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).

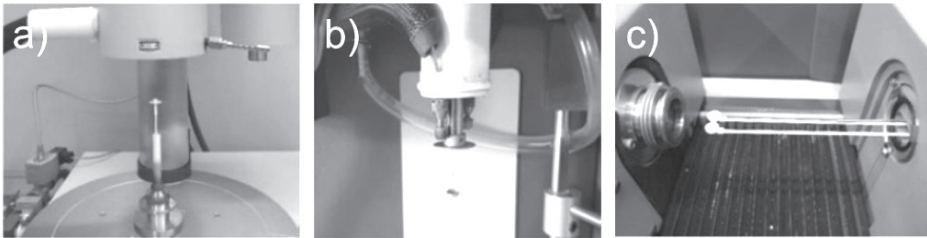


Figura 2. Clasificación de termobalanzas, a) superior, b) suspendida y c) horizontal (Auroux, 2013).

Como se comentó en la introducción, en una termobalanza se llevan a cabo experimentos a alta temperatura y la radiación térmica que llega a emitirse es considerable, lo cual puede causar daños en el equipo relacionados a la descomposición de sustancias, sobre todo de carácter corrosivo. Una de las acciones para aminorar este problema es realizar una purga con algún gas inerte como el nitrógeno (Pupăzan *et al.*, 2021). Es importante mencionar lo significativa que es la variación y comportamiento del gas en TGA, sobre todo en la etapa de purgar el equipo debido a que puede presentarse un fenómeno que se conoce como flotabilidad, derivado del cambio de

densidad y temperatura en el gas, y en consecuencia puede registrarse un aumento en el cambio aparente de masa que no es real. Algunos equipos pueden realizar de manera automática los cálculos necesarios para eliminar el exceso de datos, sin embargo, es posible hacerlo de forma manual si se ha identificado el denominado “*blanco o baseline*” del equipo, es decir, se debe hacer una corrida sin muestra, pero en las mismas condiciones de atmósfera, temperaturas e incluso el mismo crisol utilizado en todo el experimento. Al hacer lo anterior se utilizará una mayor cantidad de gas inerte y aumenta el costo del experimento, sobre todo algunos muy costosos como el helio, pero se reducirán errores en el tratamiento de los datos resultantes en TGA, por ejemplo, al aplicar algún modelo matemático para la deconvolución de los datos. Es muy recomendable realizar este proceso principalmente cuando no se conoce con exactitud la composición de la muestra (Van Humbeeck, 1998).

Características de las muestras para análisis TGA

Uno de los aspectos más relevantes para un correcto análisis en TGA es el tamaño de muestra. Es complicado poder definir exactamente el tamaño de muestra más adecuado para realizar el experimento. Al aumentar el tamaño de muestra se corre el riesgo de que el flujo de temperatura sea no uniforme y el comportamiento del gas se puede volver más errático. Por lo tanto, es más recomendable una muestra con un tamaño pequeño, que sea representativa del total del material, evitar que sea modificada al momento de su preparación final, es decir, que pueda haber alguna contaminación de la misma. Es muy conveniente que la muestra se pulverice. En procesos de

análisis TGA de biomasa, por ejemplo, se tienen buenos resultados con tamaños de partícula de 400-450 micras (Alvarado *et al.*, 2020). Es importante considerar que no todos los equipos admiten la misma cantidad, generalmente se pueden aceptar cargas de 10, 1.0, y 0.1 gramos dependiendo si son del tipo semimicro, micro y ultramicro respectivamente, aunque existen equipos que pueden aceptar hasta decenas gramos. Lo anterior cobra mayor importancia cuando se requiere el análisis de materiales muy heterogéneos y en ocasiones una pequeña cantidad de muestra no es suficiente (Bensharada, 2022). Las muestras de masa pequeña pueden proteger la termobalanza en caso de algún incidente térmico de carácter exotérmico (Craig y Reading, 2006). Existen otros aspectos importantes que se deben considerar en la muestra, como la forma superficial que presenta. Lo anterior es particularmente importante debido a que se verán afectados parámetros como la transferencia de calor y productos generados de acuerdo a la velocidad de difusión que se lleve a cabo, tales parámetros también presentarán variación de acuerdo al tamaño másico de la muestra, en este sentido es preferible tener consistencia másica. Todos estos aspectos definirán si los resultados son confiables, de calidad, comparables y por lo tanto reproducibles.

Medición de la temperatura de la muestra y termobalanza

Generalmente existe una diferenciación de temperaturas al realizar los análisis termogravimétricos, por un lado, se tiene la temperatura de la muestra y por otro la del horno. Dependiendo de condiciones como altas velocidades de calentamiento, así como de elevados flujos de gas o incluso

si existe vacío, se tendrá un desfase de temperaturas que puede ser hasta de 30°C. 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. En equipos TGA que emplean muestras grandes, de hasta decenas gramo, la temperatura de la muestra se mide mediante un termopar incrustado en la muestra. En este caso la temperatura de la muestra no es muy fiable, por ejemplo, en las biomásas lignocelulósicas que tienen baja conductividad térmica (son buenos aislantes) y la temperatura real del proceso es la que ocurre en el frente de reacción, no en el interior de la muestra donde se ubica el termopar. En equipos TGA analíticos lo habitual es emplear muestras pequeñas (mg), por lo que la medida de la temperatura de la muestra suele hacerse mediante un termopar ubicado en el crisol o colocado próximo a la muestra. En este caso, se debería emplear la temperatura de la muestra que es lo recomendable para estudios cinéticos. Es importante tener en cuenta que es precisamente esta temperatura la que determina el valor de las constantes cinéticas, por lo tanto, en procesos altamente endotérmicos o exotérmicos, puede ocurrir que la temperatura de la muestra sea inferior o superior a la programada, pero es la que realmente determina la velocidad de reacción. Si la muestra es pequeña y hay un termopar situado cerca de su ubicación, esta es la mejor referencia para los estudios cinéticos, es decir tomar la temperatura de la muestra.

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. Como puede observarse, poder controlar la temperatura de la muestra es de las acciones más importantes en análisis de TGA. Para reducir el error en tales mediciones es recomendable considerar la transferencia de calor de la muestra (tanto interna como externa), tomar la temperatura actual todo el tiempo que dure el análisis, así como tener un óptimo control de la temperatura del horno. Para este propósito es necesario contar con un termopar adecuado. 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

En el análisis termogravimétrico suelen presentarse errores sistemáticos relacionados a varios aspectos como la uniformidad de la muestra (topografía), el estado instrumental, así como las técnicas que se aplican al experimento, lo cual puede resultar en desviaciones y/o fluctuaciones que determinan la buena o mala exactitud y precisión del análisis. En este sentido, es recomendable establecer una calibración de masa y temperatura lo más óptima posible. 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. Sin embargo, es importante considerar que

en altas temperaturas (1300°C), y utilizando platino como uno de los más comunes, es posible tener degradación metálica en el soporte másico presentando en ciertos intervalos el fenómeno de flotabilidad, provocando pérdidas importantes de muestra (Gallagher, 1997). Otro aspecto significativo para un resultado aceptable en la medición de análisis TGA es cuidar la calibración de la temperatura en las cercanías de la muestra de análisis. 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. Entonces es posible el calibrado en función de una temperatura multipunto. Otra forma de determinar la calibración consiste en el cálculo de la primera derivada del TGA, es decir, el DTG (Brown *et al.*, 1994). Otro método que también presenta buenos resultados es el denominado como eslabón-fusible que utiliza materiales no inertes, y mediante la fusión de alguno de ellos sujetos a la microbalanza, se provoca una perturbación que permite la calibración de la temperatura (Vyazovkin *et al.*, 2010). Para poder realizar lo antes mencionado es necesario contar con materiales certificados por la Confederación Internacional de Análisis Térmico y Calorimetría (ICTAC) (Vyazovkin *et al.*, 2020).

Reporte de resultados del análisis TGA-DTG

La primera gráfica que puede obtenerse como resultado del análisis, es la de TGA. En general los datos representan a diversas columnas de la reducción másica (mg), temperatura (°C) y tiempo (s). En algunos equipos,

la temperatura y el tiempo pueden mostrarse en kelvin y minutos respectivamente. 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 ya sea en porcentaje o respecto a la variación de la muestra que originalmente fue establecida. 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, muestra un ejemplo del análisis termogravimétrico de biomasa marina (Alvarado *et al.*, 2022).

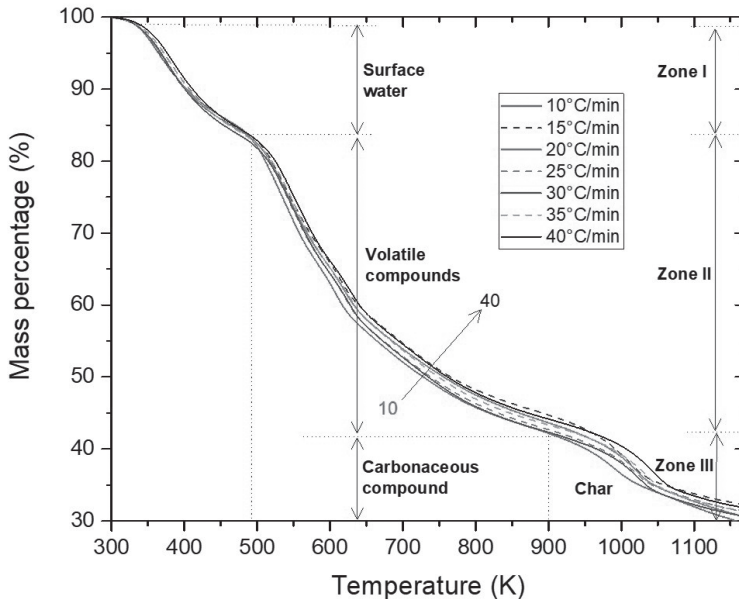


Figura 3. Curvas del análisis termogravimétrico biomasa marina en nitrógeno (Alvarado *et al.*, 2022).

En la figura 3, la curva que se presenta en diversos colores es la característica de TGA y como puede observarse existe una pendiente que va cambiando de manera constante a medida que aumenta la temperatura y la descomposición térmica, sin embargo, en ciertas partes de las curvas estas transformaciones no son tan fáciles de detectar debido a ciertos rangos de temperatura que pueden presentarse de manera superpuesta y que pueden significar pérdidas de masa muy pequeñas o apenas perceptibles. Para poder analizar de manera más eficiente tales transformaciones se calcula la primera derivada del TGA conocida como DTG. Siendo una derivada, se estudia entonces la razón de cambio o velocidad entre la masa respecto a la temperatura (dW/dT) o respecto al tiempo (dW/dt). La curva DTG puede representarse de acuerdo a las necesidades experimentales como $\%/^{\circ}\text{C}$, $\%/K$, mg/min , $\%/ \text{min}$, en el eje de las ordenadas, tal como se muestra en la figura 4.

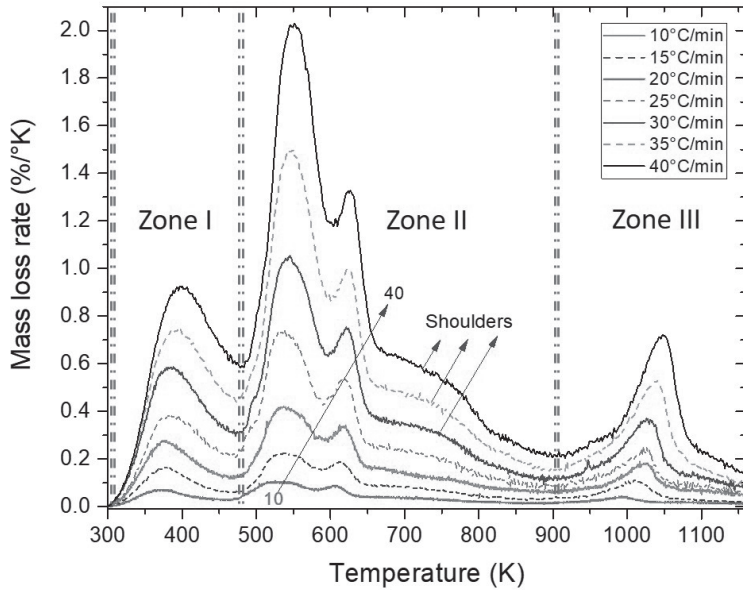


Figura 4. Curvas del análisis diferencial de biomasa marina en nitrógeno (Alvarado *et al.*, 2022).

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), sin embargo, en el análisis de una sola rampa, se recomienda unir ambos gráficos para una mejor comprensión y visualización tanto de las etapas de degradación másica como la velocidad de la misma.

Las aplicaciones del análisis diferencial son muy variadas. Debido a su confiabilidad y rapidez, en las investigaciones actuales se han pronunciado de manera significativa los estudios de optimización de residuos de biomasa agroforestal y marina basándose en esta técnica (Melikoglu *et al.*, 2023). Dentro de los estudios de caracterización básica, una de las ventajas es la determinación de parámetros tan importantes como humedad, carbono fijo, materia volátil y cenizas, es decir el análisis proximal de biomasa ya sea terrestre o marina (Zhang, *et al.*, 2023). Derivado del tratamiento de los datos de TGA, es decir, la deconvolución de las señales de la primera derivada del de análisis 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).

2.6. 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 análisis diferencial (DTG), lo cual permite el análisis de la cinética o transformaciones del proceso termogravimétrico de la biomasa sujeta a procesos térmicos de torrefacción, pirólisis, gasificación, combustión entre otros. Cabe mencionar que en los dos últimos procesos mencionados (gasificación y combustión), la pirólisis, 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 (H_2) y metano y (CH_4). Los métodos de cinética en procesos de pirólisis posibilitan lo antes mencionado, por lo tanto, es necesario el conocimiento de los modelos más pertinentes para la optimización energética de la biomasa.

2.6.1. Procedimiento para el 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. Es bien conocido que la cinética del proceso pirolítico se define de acuerdo a la expresión matemática del químico Svante August Arrhenius (1859-1927), mejor conocida como la ley de Arrhenius, la cual, permite calcular tres parámetros fundamentales, la energía de activación (E_a), orden de reacción (n) y el factor de frecuencia o pre-exponencial (A), también conocidos como

como el triplete cinético. Tal expresión, representa la descomposición térmica de la biomasa en función de la velocidad de reacción y del tiempo en condiciones donde la temperatura es constante, es decir, isotérmica. La velocidad de descomposición en condición no isotérmica se calcula a partir de la ecuación 1:

$$\frac{d}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) = A \left(\frac{-E}{R} \right) \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

Donde:

k = constante de velocidad de descomposición,

T = temperatura absoluta (K),

$f(\alpha)$ = representa el modelo de reacción el cual es función de α ,

α = grado de avance (adimensional),

t = tiempo (s),

A = es el factor de frecuencia o exponencial (min^{-1}),

E_a = energía de activación de la reacción de descomposición (kJ/mol),

R = constante de los gases ideales, $8.314 \text{ J (mol.K)}^{-1}$.

El grado de avance (α), se calcula por la expresión dada en la ecuación 2:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_f} \quad (2)$$

Donde:

m_0 = valor de la masa al inicio del experimento o masa inicial (mg),

m_i = masa instantánea a cada valor de temperatura dado (mg),

m_f = masa final de la muestra en la máxima temperatura (mg).

De acuerdo a la segunda parte de la ecuación (1), si se considera la velocidad de calentamiento (β), se puede derivar respecto a la temperatura en condiciones no isotérmicas obteniéndose la ecuación (3):

$$\frac{d}{dt} = \frac{A}{B} \exp \left[-\frac{E_a}{R} \right] f(\alpha) \quad (3)$$

La ecuación (3) puede modificarse haciendo un reordenamiento de las variables que representan el grado de avance (α) y la temperatura (T). A continuación, la ecuación resultante se integra y se obtiene una forma integral del grado de conversión que se muestra en la ecuación (4). Cabe señalar que esta ecuación no se ha resuelto completamente, es decir, no tiene una solución exacta en particular (Cai *et al.*, 2009), en este sentido se considera la resolución aproximada a través del método de Doyle (Doyle, 1962). Varios de los modelos cinéticos que se muestran en este capítulo, intentan aplicar la ecuación (4) para la determinación de los parámetros cinéticos. Es importante mencionar, para que la ecuación (4) pueda describir el proceso de pirólisis, es necesario que la diferencia de temperaturas entre la muestra y la de referencia no sea significativa (Ali *et al.*, 2018).

$$G(\alpha) = \int_{T_0}^T \frac{A}{B} \exp \left[-\frac{E_a}{R} \right] * d \quad (4)$$

Existen decenas de modelos matemáticos para la determinación de los parámetros cinéticos (E_a , n y A) arriba citados (Aranzazu *et al.*, 2013). La clasificación general se basa en modelos no iso-conversionales destacando los de Agrawal (Chen *et al.*, 2005), Briodo (Mano *et al.*, 2003), Coats Redfern (Criado *et al.*, 1987), Horowitz-Metzger (López *et al.*, 2020), Freeman-Carroll (Castells *et al.*, 2021). También se destacan modelos cinéticos iso-conversionales como los de Tang (Açıklın, 2021) y Senum Yang (Chen *et al.*, 2019). Adicionalmente existen seis de los modelos de mayor publicación en la actualidad tal como se muestra en la tabla 1. En

este caso los primeros cinco 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 de la tabla 1, a diferencia de los anteriores es no-iso-conversional (Vyazovkin, 2020). En todos los modelos cinéticos que se han mencionado, es imperativo conocer el valor de la pendiente “*m*” que se calcula en función de la línea recta obtenida del gráfico según el modelo aplicado. Es importante mencionar que las ecuaciones en la tabla 1, pueden tener origen en alguna transformación de las ecuaciones (3) y/o (4), lo cual define si el método es diferencial o integral.

Tabla 1. Modelos iso-conversionales para la determinación de los parámetros cinéticos (Alvarado *et al.*, 2022).

Modelo	Ecuación
Friedman	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = -\frac{Ea}{R} * \frac{1}{T} + \ln(A)$
Flynn-Wall-Ozawa (FWO)	$\ln\beta = -1.052 \frac{Ea}{R} * \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{0.0048AEa}{R}\right)$
Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)	$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = -\frac{Ea}{R} * \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{AR}{Ea}\right)$

$$\text{Starink} \quad \ln\left(\frac{\beta}{T^{1.92}}\right) = -1.0008 \frac{Ea}{R} * \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{0.732AEa}{R}\right)$$

$$\text{Popescu} \quad \ln\left(\frac{\beta}{T_n - T_m}\right) = -\frac{Ea}{R} * \frac{1}{T\xi} + \ln\left(\frac{A}{F_{mn}}\right)$$

$$\text{*Kissinger} \quad \ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = -\frac{Ea}{R} * \frac{1}{T_m} + \ln\left(\frac{AR}{Ea}\right)$$

* modelo no iso-conversional.

Donde: α = conversión, t = tiempo, Ea = energía de activación, T = temperatura, R = constante de gases ideales y β = velocidad de calentamiento.

Para calcular la energía de activación (Ea) 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. En este sentido un gráfico de las expresiones:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) \text{ vs } \frac{1}{T}, \quad \ln(\beta) \text{ vs } \frac{1}{T}, \quad \ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) \text{ vs } \frac{1}{T}, \quad \ln\left(\frac{\beta}{T^{1.92}}\right) \text{ vs } \frac{1}{T},$$

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_n - T_m}\right) \text{ vs } \frac{1}{T\xi}, \text{ y } \ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) \text{ vs } \frac{1}{T_{max}},$$

correspondientes a los métodos de Friedman, FWO, KAS, Starink, Popescu y Kissinger respectivamente, dará como resultado una línea recta que tendrá como pendiente (m) y las

$$\text{expresiones en función del método aplicado: } -\frac{Ea}{R}, \quad -1.052 \frac{Ea}{R}, \quad -\frac{Ea}{R},$$

$$-1.0008 \frac{Ea}{R}, \quad -\frac{Ea}{R} \text{ y } -\frac{Ea}{R}.$$

Con estos valores de m , se calcula la energía de activación (Ea) en todo el rango del grado de avance, $\alpha = 0.10 - 0.90$, para cada línea recta y en cada método con excepción al método Kissinger.

Para el cálculo del valor del factor pre-exponencial (A) se procede de la siguiente manera. El factor pre-exponencial (A) está directamente relacionado con el valor de la ordenada ó intercepto al origen de acuerdo con cada modelo graficado. En este sentido, y obteniendo de forma manual

el valor del intercepto (b) de cada una de las líneas rectas, el valor del factor A , se puede calcular haciendo el despeje en función de las propiedades de logaritmo natural (\ln) y la exponencial (e). Las expresiones utilizadas para el cálculo del factor A en cada uno de los seis métodos mostrados en la tabla 1 se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Determinación del factor pre-exponencial (Alvarado *et al.*, 2022).

Modelo	Friedman	FWO	KAS	Starink	Popescu	Kissinger
$A \longrightarrow$	e^b	$\frac{R * e^b}{0.0048E_a}$	$\frac{E_a * e^b}{R}$	$\frac{R * e^b}{0.732E_a}$	$\ln\left(\frac{1 - \alpha_m}{1 - \alpha_n}\right) * e^b$	$\frac{E_a * e^b}{R}$

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 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Expresiones matemáticas para el análisis termodinámico.

Magnitud	Ecuación
Entalpía (ΔH)	$\Delta H = E_a - RT_\alpha$
Energía libre de Gibbs (ΔG)	$\Delta G = E_a + R * T_m * \ln \left(\frac{K_B * T_m}{h * A} \right)$
Entropía (ΔS)	$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_m} * 1000$

Donde: E_a , energía de activación, R , constante de gases ideales, T_α , temperatura en el grado de conversión, T_m , máxima temperatura en el DTG, K_B , constante de Boltzmann (1.381E-23 J/K), h , constante de Plank (6.626E-34 J.s) y β , velocidad de calentamiento (15°C/min).

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 al 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, etc. Tales gases, principalmente H_2 y CH_4 , pueden ser almacenados y redirigidos para su uso directo en celdas de combustible de temperatura intermedia (SOFC-IT) como alternativa para la generación de energía eléctrica en zonas de difícil acceso, donde las redes eléctricas como las de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), no llegan a abastecer de energía a las comunidades rurales.

Referencias

- Açıklan, K. (2021). Determination of kinetic triplet, thermal degradation behaviour and thermodynamic properties for pyrolysis of a lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 337, 125438.
- 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., Rutiaga-Quiñones, J. G., Ávalos-Rodríguez, M.L., Alcaraz-Vera J. V, Valencia-Espino, J., Guevara-Martínez, S. J., Márquez-Montesino, F., & Alfaro-Rosas A. (2020). Thermal degradation kinetics and FT-IR analysis on the pyrolysis of *pinus pseudostrobus*, *pinus leiophylla* and *pinus montezumae* as forest waste in western Mexico. *Energies*, 13(4), 969.
- 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.

Cai, J. M., & Bi, L. S. (2009). Kinetic analysis of wheat straw pyrolysis using isoconversional methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(1), 325-330.

Castells, B., Amez, I., Medic, L., & García-Torrent, J. (2021). Torrefaction influence on combustion kinetics of Malaysian oil palm wastes. *Fuel Processing Technology*, 218, 106843.

Chen, H., Liu, N., & Shu, L. (2005). Error of kinetic parameters for one type of integral method for thermogravimetric measurements. *Polymer degradation and stability*, 90(1), 132-135.

Chen, R., Li, Q., Xu, X., & Zhang, D. (2019). Pyrolysis kinetics and reaction mechanism of representative non-charring polymer waste with micron particle size. *Energy Conversion and Management*, 198, 111923.

- 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.
- Criado, J., Ortega, A., Rouquérol, J., & Rouquerol, F. (1987). Un nuevo método de Análisis Térmico: El análisis térmico a velocidad de transformación controlada (ATVC). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 26(1), 3-11.
- Devitte, C., Souza, A. J. D., & Schirmer, G. V. (2021). Temperature evaluation in CFRP drilling. In *Brazilian Conference on Composite Materials*.
- 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.
- López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J. & Morales-Máximo, M. (2020). A prospective study of the exploitation of pelagic Sargassum spp. as a solid biofuel energy source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706.

- 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.
- Mano, J. F., Koniarova, D., & Reis, R. L. (2003). Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. *Journal of materials science: Materials in medicine*, 14(2), 127-135.
- Melikoglu, M., Ozdemir, M., & Ates, M. (2023). Pyrolysis kinetics, physicochemical characteristics and thermal decomposition behavior of agricultural wastes using thermogravimetric analysis. *Energy Nexus*, 100231.
- Pupăzan, G., Burian, S., Darie, M., Csaszar, T., Colda, C., Grecea, D., Andris, A., & Beldiman, A. (2021). Determinations of gas concentration in tests carried out on pressurized carcasses. *Annals of the University of Petrosani Electrical Engineering*, 23.
- 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. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100558.
- Van Humbeeck, J. (1998). Simultaneous thermal analysis, Chap. 11. In M. E. Brown (Ed.), *Handbook of thermal analysis and calorimetry* (Vol. 1, pp. 497–508).

- 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., Burnham, A. K., Favergeon, L., Koga, N., Moukhina, E., Pérez-Maqueda, L. A., & Sbirrazzuoli, N. (2020). ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of multi-step kinetics. *Thermochimica acta*, 689, 178597.
- 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.
- Zhang, S., Dong, Y., & Qi, G. (2023). TG-GC-MS study of pyrolysis characteristics and kinetic analysis during different kinds of biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(30), 11171-11179.

Capítulo 9: Caracterización Energética: Poder Calorífico, Compuestos Poliméricos

Colin Urieta Serafín ¹ & Carrillo Parra Artemio²

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 principalmente orgánicas de alta masa molecular, se pueden encontrar naturalmente como la celulosa, el almidón, las proteínas entre otros, se desarrollan sintéticamente como el polietileno, poliestireno, etc. Los polímeros de origen natural son materia energética compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina que se integran como una biomasa lignocelulósica presente en madera, cultivos, residuos agrícolas y forestales, su poder calorífico puede variar dependiendo de la composición (desde 14 hasta 23 MJ/kg).

Individualmente el poder calorífico superior en celulosa tiene un valor poco variable de alrededor de 17.36 ± 0.06 MJ/kg, mientras que en la hemicelulosa es ligeramente diferente a la celulosa por el tipo de carbohidratos que integran su estructura, en la lignina su valor varía de 23.25 a 27.85 MJ/kg, y de 23.95 a 28.36 MJ/kg en función de la biomasa analizada. La lignina a diferencia de la celulosa y hemicelulosa tiene más bajo contenido de oxígeno y mayor contenido de carbono lo que se traduce en mayor poder calorífico. El poder calorífico en la biomasa se relaciona con la cantidad de enlaces carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno. Una caracterización a fondo de los biocombustibles como el contenido de humedad, poder calorífico, carbono fijo, material volátil, contenido de cenizas y la proporción lignocelulósica permite su aprovechamiento como recurso energético, esta caracterización es realizada bajo las normas y métodos (ASTM, ISO, UNE, etc.). Finalmente se han desarrollado una serie de modelos para predecir el poder calorífico a partir de diferentes biomásas, el primer tipo de modelos son basados en el análisis que indican las proporciones de holocelulosa, lignina y extraíbles, el segundo tipo de modelo se basa en el análisis próximo donde se tienen en cuenta el contenido de carbono fijo, materia volátil, cenizas y humedad y el tercer tipo de modelos es basados en el análisis de elementales que incluyen carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro, oxígeno y el contenido de cenizas en el combustible.

Palabras clave: Biomasa, material volátil, carbono, celulosa, hemicelulosa, lignina, ASTM, ISO.

Introducción (compuestos poliméricos)

Los polímeros constituyen una familia de materiales extremadamente heterogéneos. Estas macromoléculas se originan a partir de la unión de unidades más pequeñas, conocidas como monómeros. Estos compuestos tienen una amplia variedad de aplicaciones en la industria, como suplementos en la alimentación animal hasta la producción de combustible para energía. También encuentran utilidad en la industria alimentaria como colorantes naturales y saborizantes. Además, desempeñan un papel fundamental en el control de infecciones en la cosecha y postcosecha, la prevención de enfermedades y su incorporación como refuerzos en polímeros termoplásticos (Sánchez et al., 2022).

Debido a su bajo costo, amplia variedad de propiedades y versatilidad, el uso de materiales poliméricos ha experimentado un significativo aumento a nivel mundial. Estas características les han permitido encontrar aplicaciones en diversos sectores comerciales e industriales, lo que ha generado un crecimiento constante en la demanda global. En 2017 y 2018, la producción de estos compuestos superó las 320y359 millones de toneladas, respectivamente, con China liderando como el principal productor con un 30% de la producción mundial (Posada & Flores, 2022).

Los compuestos poliméricos, pueden ser empleados como combustibles sólidos debido a su alto contenido de carbono y su capacidad de liberar energía durante la combustión. Por ello la determinación del poder

calorífico de los compuestos poliméricos es fundamental para establecer su capacidad energética y poder compararlos con otros tipos de combustibles sólidos. Asimismo, la caracterización energética de estos compuestos es relevante para evaluar su potencial como fuente de energía renovable y su impacto ambiental.

Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación es determinar y comparar el poder calorífico de compuestos poliméricos con el fin de evaluar su capacidad energética en relación con otros combustibles sólidos. Además, se busca analizar la caracterización energética de estos compuestos para evaluar su impacto ambiental y su potencial como una fuente de energía renovable. Este estudio contribuirá a comprender mejor las posibilidades de utilización de los compuestos poliméricos en aplicaciones energéticas sostenibles

El poder calorífico

El poder calorífico se refiere al calor desprendido por la oxidación completa de una masa o volumen conocido de combustible, que se encuentra a una temperatura y una presión establecidas. La cantidad de calor liberado durante la combustión completa del material es expresada en energía por cantidad específica, las unidades para expresar esta energía en el SI son MJ/kg o MJ/m³ en el caso de energía por volumen. Esta cantidad de energía variará de acuerdo con la tecnología de conversión y el tipo de combustible (McKendry, 2002). El poder calorífico de los combustibles es clasificado como: a) Poder calorífico superior (bruto) que es la máxima cantidad de energía potencialmente recuperable (incluyendo el calor de vaporización

del agua) y b) El poder calorífico inferior (neto) que es igual al poder calorífico superior sin incluir al calor latente del vapor de agua. La relación entre el poder calorífico superior (HHV) e inferior (LHC) se puede expresar mediante la ecuación:

$$L = H - h_f * m_w$$

Donde h_f se define como el calor latente del agua y m_w es la masa del agua en los materiales de combustión por unidad de masa del combustible (Rivera et al., 2012).

El poder calorífico puede variar dependiendo de la composición y las propiedades del combustible. Por ejemplo, los compuestos poliméricos, como el plástico, pueden tener un poder calorífico diferente al de otros combustibles sólidos debido a su estructura química y contenido de carbono. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas específicas para determinar el poder calorífico de cada tipo de combustible sólido.

La Tabla 1 presenta el poder calorífico superior e inferior de diferentes materiales poliméricos.

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

Polipropileno (PP)	47.1	44.6
Poliestireno (PS)	41.7	40.0
Polimetilmetacrilato (PMMA)	26.8	25.0
Maderas blandas	20.2	19.1
Maderas duras	19.7	18.4
Bagazo	19.3	18.2
Rastrojo de maíz	17.7	17.5

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

La biomasa es considerada como un recurso energético importante dentro de las energías renovables, su materia prima es integrada principalmente por madera, cultivos, residuos de agrícolas y forestales. Está compuesta principalmente por tres polímeros orgánicos: celulosa, hemicelulosa y lignina y en menor proporción se compone por almidones, azúcares, cenizas, lípidos, proteínas, hidrocarburos, agua y otros compuestos. Estos polímeros se entrelazan en una estructura compleja que le otorga a la biomasa su versatilidad y utilidad en numerosas industrias. De esta manera, la biomasa puede considerarse, en esencia, un compuesto polimérico que desempeña un papel clave en la producción de energía, materiales y productos químicos sostenibles.

Una de las características más importantes para su aprovechamiento como recurso energético es el poder calorífico ya que los diferentes métodos de procesamiento térmico requieren conocer a fondo las características específicas de las biomazas lignocelulósicas, esta caracterización incluye, contenido de humedad, poder calorífico, carbono fijo, material volátil, contenido de cenizas y la proporción lignocelulósica. Se ha encontrado que

el poder calorífico de los biocombustibles generalmente varía entre 18 y 22 MJ/kg (Koppejan & Van Loo, 2012) otros autores también consideran valores desde 14 hasta 23 MJ/kg (base seca). Además del tipo de biomasa el valor del poder calorífico también puede variar significativamente dependiendo del clima y suelo en el cual ha cultivado la biomasa (Ciolkosz et al., 2010). Por ejemplo, un cultivo que pasó por un proceso de hibernación posee una calidad superior como biocombustible, debido a que presenta baja contenido de fósforo, potasio, azufre y cloro, y una alta densidad en la pared celular (Tahir et al., 2011).

Celulosa, Hemicelulosa, Lignina, Extractos

La celulosa, hemicelulosa y lignina son los mayores biopolímeros que junto a los compuestos lípidos, proteínas, azúcares simples, almidones, hidrocarburos, cenizas y el agua constituyen la mayor parte de la biomasa. La celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ es el componente primario de la pared celular (40-44% en madera), con alto grado de polimerización ($\sim 10,000$) y gran peso molecular ($\sim 500,000$), su degradación térmica sucede entre 271-377 °C (Figura 1.I).

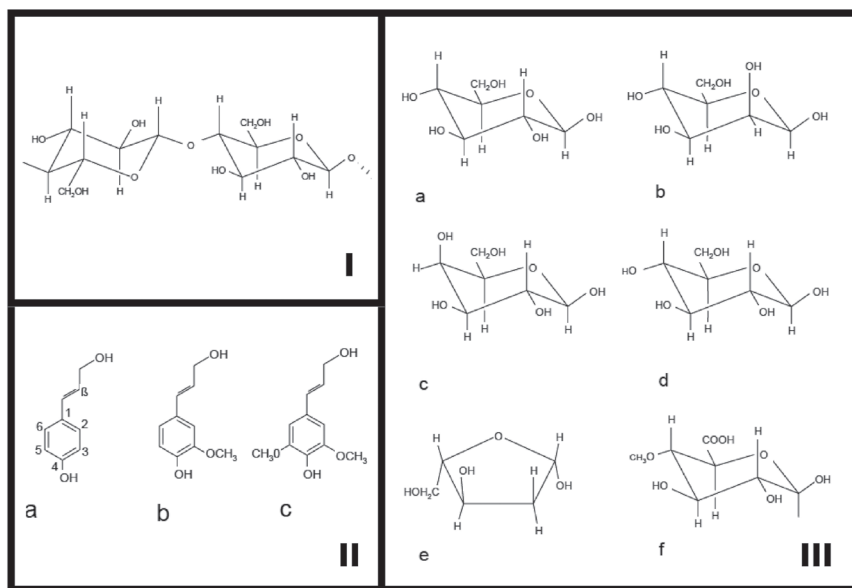


Figura 1. Estructura química de la celulosa; dos monómeros de D-glucosa formando un 'glucano'. Imagen basada en Rowell (2005). II.- Estructuras de los precursores de la lignina: a) p-coumarilalcohol, b) Coniferilalcohol y c) Sinapilalcohol. Imágenes basadas en Rowell (2005) y Fengel & Wegener (1983). III.- Componentes monoméricos de hemicelulosa de la madera. a) β -D-Glucosa, b) β -D-Manosa, c) β -D-Galactosa, d) β -D-Xilosa, e) α -L-Arabinosa y f) Ácido 4-O-Metilgucurónico. Imágenes basadas en Rowell (2005).

Mientras que la hemicelulosa ($C_5H_8O_4$)_n (Figura 1. III), es un heteropolisacarido de estructura amorfa y bajo grado de polimerización (~100–200) por lo que su degradación térmica inicia a menor temperatura (130-270 °C), varía en composición y estructura dependiendo de la biomasa

(20-30% en madera), puede llegar a contener algunos de los azúcares simples como d-xilosa, d-glucosa, d-galactosa, l-arabinosa, d-manosa y ácido d-glucurónico. Por otra parte, la lignina es otro de los biopolímeros (fenilpropano) más abundantes en la naturaleza (25-35% en madera), es el constituyente principal de la pared celular, es un polímero altamente ramificado de 4-propenil fenol, 4-propenil-2-metoxi fenol, 4-propenil-2.5-dimetoxil fenol, su degradación térmica se presenta entre 380 y 550 °C (Figura 1. II).

La diferencia en la composición química de las estructuras de las macromoléculas que componen la mayor parte de la biomasa biopolímeros propician diferencias en el poder calorífico. La diferencia en la estructura química de estas macromoléculas (mayor grado de oxidación en celulosa que en lignina) origina una diferencia en el valor del poder calorífico, estudios reportan valores alrededor de 18.6 MJ/kg en holocelulosa y para lignina de 23.3-25.6 MJ/kg. Según datos investigados por Maksimuk et al., (2021) el valor promedio de referencia del Poder calorífico superior de la celulosa es 17.36 ± 0.06 MJ/kg, siendo el mismo valor experimental encontrado por ellos e igual al Poder calorífico de la celulosa del almidón reportado por Kabo et al., (2013). Por lo que se puede establecer que el Poder calorífico de la celulosa de la biomasa no depende de la especie de madera y planta. Por otra parte, el Poder calorífico de la hemicelulosa es ligeramente diferente a la celulosa debido a que ésta compuesta por carbohidratos clasificados como hexosanos y pentosas, a diferencia de las hexosas que tienen la misma composición elemental que la celulosa

($C_6H_{10}O_5$), las pentosas tienen mayor Poder calorífico debido a que tienen menos átomos de oxígeno (4%). Demirbas (2017) propone que el valor para la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) sea considerado como 17.5 MJ/kg. Mientras que el Poder Calorífico de la lignina se encuentra en el rango de 23.25 a 27.85 MJ/kg, y de 23.95 a 28.36 MJ/kg según el tipo de materia prima y el método empleado para el aislamiento (Maksimuk et al., 2021).

En las plantas la pared celular almacena un grupo de sustancias denominadas extraíbles los cuales pueden ser arrastrados con una serie de solventes (hexano, acetona, metanol, agua, etc.) afines a su polaridad como fenoles, aldehídos, ácidos bencenocarboxílicos, y cetonas; y otros de tipo no polar como alcoholes grasos, alcanos, aldehídos, cetonas, ácidos grasos y ceras. Las hojas y corteza generalmente contienen una mayor cantidad de extractivos que en las paredes celulares de la madera y tejidos leñosos, su contribución al poder calorífico es mayor que el presentado en los compuestos estructurales (Shafizadeh, 1981). Valores del Poder calorífico para los extractivos son muy variables debido a que pueden estar formados por diferentes compuestos, por ejemplo, el álamo y el abeto fueron reportados con 37.78 y 38.10 MJ/ kg, respectivamente, mientras que las resinas se encontraron en 32.32 MJ /kg. En base a la proporción de estos polímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina) en la biomasa se puede predecir el comportamiento en algunos procesos como la pirólisis independientemente del origen. La proporción de celulosa-lignina puede incrementar desde 0.5 a 2.7, mientras que la relación hemicelulosa-lignina

es desde 0.5 a 2.0 para una biomasa común (Jones et al., 2006) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

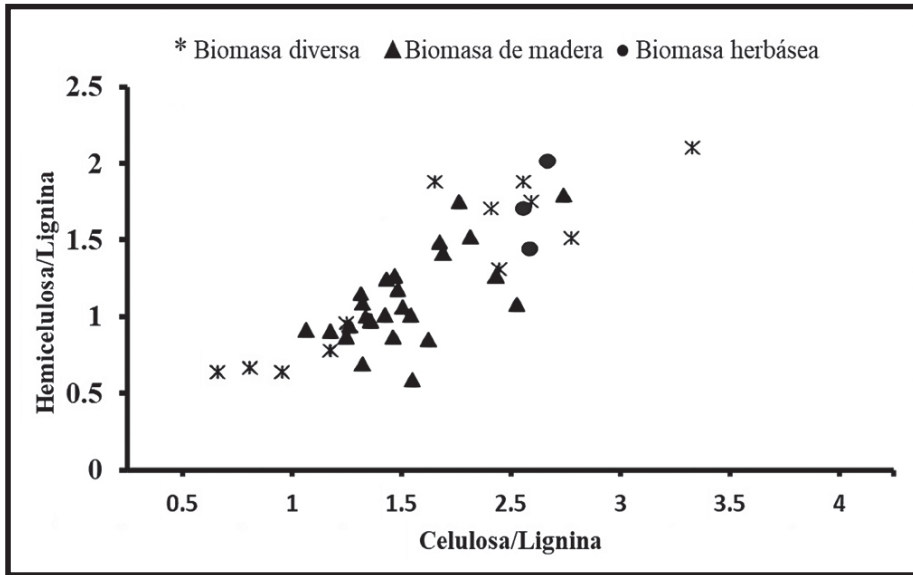


Figura 2. Clasificación de biomasa de acuerdo con la proporción de celulosa/lignina y hemicelulosa/lignina (elaborado a partir de Jones et al., 2006).

A pesar de que hay pocos estudios relacionando el Poder calorífico con el contenido de celulosa y lignina, se ha demostrado que existe una correlación directa, esto concuerda con los datos publicados por Carrillo-Parra et al. (2021); Quiñones-Reveles et al. (2021); Contreras-Trejo et al. (2022) y García-Quezada et al. (2022); y que se muestra en la Tabla 2 y Figura 3.

Tabla 2. Poder calorífico vs Lignina-Hemicelulosa y Poder Calorífico vs Lignina- Celulosa de diversas especies analizadas por Carrillo-Parra et al. (2021); Quiñones-Reveles et al. (2021); Contreras-Trejo et al. (2022) y García-Quezada et al. (2022).

Biomasa	Lignina + Hemicelulosa (% base seca)	Lignina + Celulosa (% base seca)	Poder calorífico (MJ/kg)
<i>Agave durangensis</i>	25.48	51.65	17.33
<i>Agave tequilana</i>	19.51	42.96	17.1
<i>Pinus</i> spp.	45.57	59.65	20.63
<i>Pennisetum</i> sp.	34.63	48.86	18.17
<i>Carya illinoensis</i>	48.24	68.87	19.86
<i>Elaeis guineensis</i>	35.31	58.63	22.19
<i>Manguifera indica</i>	27.28	36.96	19.41
<i>Psidium guajava</i>	34.82	64.55	19.74
<i>Malus domestica</i> (leña)	30.30	59.91	19.58
<i>Malus domestica</i> (poda)	29.57	51.43	19.65
<i>Manguifera indica</i>	29.78	60.65	19.95
<i>Juniperus deppeana</i>	47.92	72.64	21.42
<i>Pinus durangensis</i>	41.20	69.64	20.69
<i>Pinus patula</i>	39.72	73.62	20.91
<i>Quercus conzattii</i>	40.97	57.02	19.98
<i>Quercus laeta</i>	36.82	54.90	20.21
<i>Quercus sideroxyla</i>	39.43	62.73	20.38
<i>Arbutus xalapensis</i> (sin corteza)	76.10	64.72	18.93
<i>Juniperus deppeana</i>	81.10	70.90	20.21
<i>Quercus sideroxyla</i>	83.43	72.44	18.68
<i>Arbutus xalapensis</i> (sin corteza)	77.34	66.85	18.32

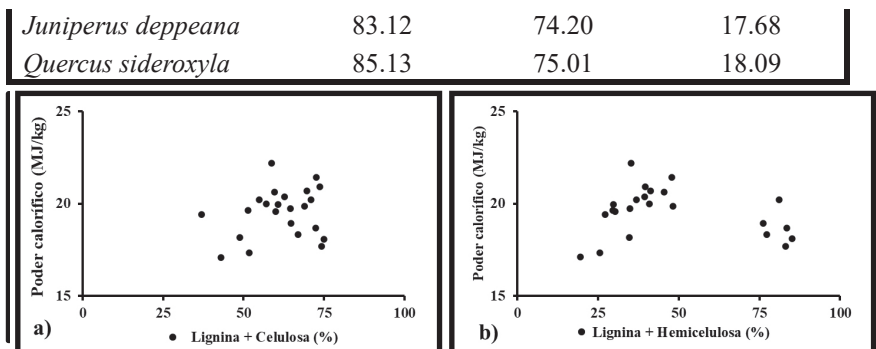


Figura 3. a) Poder calorífico vs Lignina + Celulosa y b) Poder calorífico vs Lignina + Hemicelulosa de diversas especies analizadas por Contreras-Trejo et al. (2022); Carrillo-Parra et al. (2021); García-Quezada et al. (2023); Quiñones-Reveles et al. (2021).

La lignina usualmente tiene más bajo contenido de oxígeno y mayor contenido de carbono que la celulosa y hemicelulosa lo que significa que la biomasa con alto contenido de lignina contiene un alto poder calorífico (Rinaldi & Schüth, 2009).

Humedad, Material Volátil, Cenizas, Carbono fijo

La humedad contenida en la biomasa juega un papel fundamental en el poder calorífico durante el proceso de combustión. Cuando las partículas del biocombustible se calientan, se produce una significativa pérdida de energía latente debido a la evaporación del agua contenida en la biomasa. Esta evaporación conlleva una disminución de la eficiencia energética, lo que resalta la importancia de mantener un bajo contenido de humedad. Un bajo contenido de humedad es un indicativo esencial para mejorar de

manera sustancial el poder calorífico en el proceso de combustión. La Figura 4 muestra el efecto del contenido de humedad en el poder calorífico de diferentes tipos de biomasa.

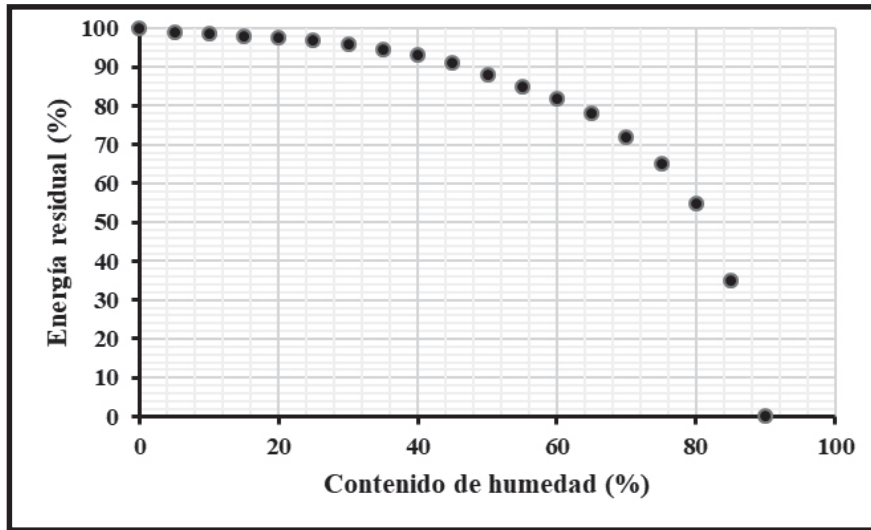


Figura 4. Relación de la energía disponible (20 MJ/kg) en la biomasa contra el contenido de humedad en los biomateriales (energía de vaporización 2.3 MJ/kg), (Elaborado a partir de Jenkis et al., 2019)

El material volátil se desprende de la biomasa en las primeras etapas de combustión (160-250 °C), entre los que se encuentran principalmente CO, CO₂, H₂O, CH₄, H₂ y otros compuestos orgánicos volátiles; llega (dependiendo del biomaterial) a constituir hasta el 80% de la biomasa además el contenido de material volátil contribuye al 70% del calor de combustión de la biomasa lo que lo hace la parte dominante del proceso (Williams et al., 2012). Análisis térmicos en madera muestran que la

pirolisis de la celulosa y hemicelulosa producen principalmente materiales volátiles mientras que la lignina origina fundamentalmente carbón (Shafizadeh, 1981).

El contenido y compuestos químicos que forman las cenizas en los materiales lignocelulósicos es variado dependiendo de la biomasa (desde 1% a 16%), sitio de cultivo o por contaminación de suelo al momento de su extracción. La madera tiene alrededor del 0.5% integrada por metales alcalino, cationes alcalinotérreos como carbonatos, sales carboxílicas y silicio el cual llega a ser abundante (hasta 18%) en paja de cereales (Shafizadeh, 1981). De acuerdo con Jenkis (1989) la concentración de cenizas en los biomateriales influye en el poder calorífico además de que algunos elementos funcionan como catalizadores en la descomposición térmica también menciona que en maderas con un promedio menor al 1% se tienen hasta 20 MJ/kg (base seca) y que por cada 1% de incremento en su contenido el poder calorífico desciende en 0.2MJ/kg, caso contrario sucede en la biomasa de origen agrícola con bajo poder calorífico debido a su alto contenido de cenizas.

El contenido de carbón fijo es la diferencia en porcentaje de los contenidos de humedad, cenizas y material volátil. De acuerdo Vassilev et al. (2010) el contenido de carbón fijo es más bajo en biocombustibles que en los combustibles fósiles sólidos, su valor se le encuentra generalmente en el rango de 1-38% (base seca) y normalmente decrece en la siguiente relación de biomásas: Residuos herbáceos y agrícolas > biomasa herbácea y

agrícola > madera y biomasa leñosa > paja de herbáceos y agrícolas > pasto de herbáceos y agrícolas > biomasa animal > biomasa contaminada esta proporción se relaciona directamente con el poder calorífico ya que por cada incremento en un 1% se incrementa el poder calorífico en aproximadamente 0.39% MJ/kg (base seca)

Elementos (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno)

Las biomásas lignocelulósicas son compuestas en primer orden por los elementos carbón, hidrógeno y oxígeno en porcentajes de 37-56%, 5-7% y 32-46% (base seca) respectivamente (Huang & Lo, 2020). Los contenidos de azufre y nitrógeno son bajos en la mayoría de las especies con biomasa lignocelulósica siendo el rango más amplio en el contenido de nitrógeno que en azufre, la humedad y cenizas complementan la mayor parte de la biomásas (Wang & Luo, 2016).

Las biomásas lignocelulósicas tienen un alto contenido de oxígeno con respecto a los hidrocarburos lo que no contribuye al poder calorífico sumado a altos contenidos de hidrógeno que producen volátiles y líquidos (agua) haciendo que sea menos beneficioso al poder calorífico (Basu, 2010). La diferencia del poder calorífico entre los combustibles biológicos y fósiles es por la alta proporción de oxígeno e hidrógeno comparado con el carbón presente en los fósiles ya que la cantidad de energía contenida en los enlaces se va incrementando de carbón-oxígeno seguida de carbón-hidrógeno siendo la máxima energía en los enlaces carbón-carbón (McKendry, 2002; Rinaldi & Schüth, 2009; Basu, 2010).

El análisis de los elementos químicos (C, N, H, O, S) y cenizas en los biocombustibles proporcionan la cantidad de enlaces carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno que refleja el poder calorífico de biocombustibles sólidos, estas proporciones se pueden observar en la Figura 5 para muestras de biomasa lignocelulósica.

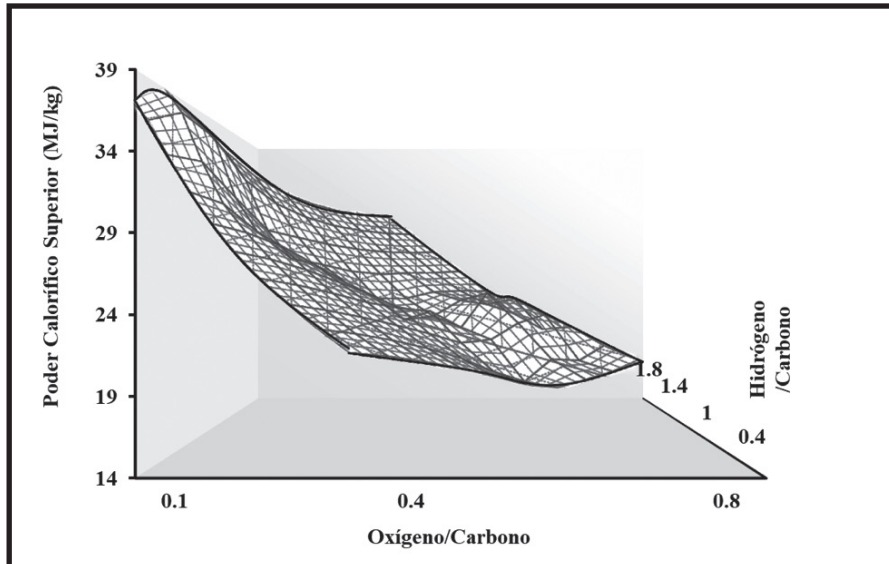


Figura 5. Correlación entre el poder calorífico superior y las proporciones de enlaces entre Hidrógeno/ Carbono y Oxígeno/Carbono para muestras de biomasa lignocelulósicas (elaborado a partir de Williams et al., 2012)

Métodos para la caracterización de los biopolímeros

La calidad de los biopolímeros se determina a partir de varias características. Una de las más importantes es el contenido de humedad, que indica la cantidad de agua presente en el combustible. Otro aspecto relevante es el poder calorífico, que es la cantidad de energía que se libera

al quemar el combustible. Este valor es fundamental para evaluar la eficiencia energética de los biocombustibles sólidos. La descripción de las propiedades de los biopolímeros es realizada bajo las normas y métodos (incluyendo los utilizados en otros combustibles). La Tabla 3 muestra algunas de las normas utilizadas en la determinación de las propiedades de las biomásas.

Tabla 3. Métodos de análisis para biomásas.

Propiedad	Norma		
	ASTM	ISO	UNE
Poder calorífico	E711-23e1	18125:2017	UNE-EN-14918
Análisis proximal			
Contenido de humedad	E871-82	18134-3:2015	UNE-EN 14774-1
Cenizas	D1102-84/E830-87	18122:2022	UNE-EN 14775
Material volátil	E872-82	18123:2015	UNE-EN 15148
Carbono fijo	100 - (Contenido de humedad +Material volátil +Cenizas)		
Análisis elemental			
Carbono, Hidrógeno	E777-23	16948:2015	UNE-CEN-TS 15104
N	E778-15	16948:2015	UNE-CEN-TS 15104
S	E775-15	16994:2016	
Cl	E776-16	16994:2016	
Cenizas (elementos)	D368-21/D2795-95	16967:2015	

Método analítico (Bomba calorimétrica)

La bomba calorimétrica es el instrumento estándar que se usa para determinar el poder calorífico superior de sustancias combustibles (sólidas y líquidas), el calorímetro usa gas oxígeno bajo presión en un sistema cerrado. Las determinaciones se realizan en base a normas y se les clasifica por el tipo de la cámara que utilizan en: Adiabáticas (cámara con aislante térmico) e Isoperibólica en la cual la celda de combustión es cubierta por una cámara con agua con lo cual la temperatura circundante es constante mientras que la temperatura de la bomba y la celda se elevan a medida que el calor se libera por la combustión.

Modelos

La literatura ha documentado una serie de ecuaciones diseñadas para predecir el poder calorífico de los combustibles. Inicialmente, estas ecuaciones se desarrollaron principalmente en el contexto de los combustibles fósiles a finales del siglo XIX. Sin embargo, no fue sino hasta la década de los 80 que empezaron a surgir ecuaciones relacionadas con la biomasa. Estas ecuaciones se basan en análisis químicos de los materiales lignocelulósicos, que incluyen análisis de composición química estructural, análisis elemental y análisis proximales.

Modelos basados en el análisis estructural

El poder calorífico de los biocombustibles es calculado a partir de los análisis que determinan las proporciones de holocelulosa (celulosa más hemicelulosa), lignina y extraíbles. El primer modelo utiliza la composición química estructural de la biomasa (lignina, celulosa,

hemicelulosa, cenizas y extractivos) en este tipo de modelo de ecuaciones utiliza la variabilidad del contenido de lignina (17.3-29.2 MJ/kg) en las biomásas lignocelulósicas. La Tabla 4 muestra algunas de las ecuaciones publicadas con la biomasa utilizada.

Tabla 4. Modelos basados en la composición estructural de la biomasa.

Modelos
<ul style="list-style-type: none"> • $HHV = 0.17389[Ce] + 0.26629[L] + 0.32187[E]$ (Shafizadeh & Degroot, 1976) Biomasa: Lignocelulósicos.
<ul style="list-style-type: none"> • $HHV = 0.17389[Ce] + 0.26629(100 - [Ce^*])$ (Tilman, 1978) Biomasa: Madera.
<ul style="list-style-type: none"> • $HHV = (1 - [cenizas]/([Ce] + [L] + [E])) (0.17389[Ce] + 0.26629[L] + 0.32187[E])$ (Jiménez y González, 1991) Biomasa: Paja de trigo, ramas y madera de olivo, tallos de girasol, cáscaras de semillas de girasol, huesos de aceituna, residuos de eucalipto.
<ul style="list-style-type: none"> • $HHV = 0.383[E] - 0.0387$ (Demirbaş, 2004) Biomasa: Cáscaras de avellana, paja de trigo, cáscaras de olivo, madera de haya, madera de abeto, mazorcas de maíz, residuos de té, cáscaras de nuez, cáscaras de almendra, cáscaras de girasol. HHV (poder calorífico superior); Ce (celulosa + hemicelulosa); L (lignina); E (extractivos).

Modelos basados en el análisis próximo.

Los modelos de análisis proximal tienen en cuenta el contenido de carbono fijo, materia volátil, cenizas y humedad. La variedad de ecuaciones disponibles es extensa, ya que abarca una amplia gama de biomateriales. En la Tabla 5 adjunta se presentan algunas de estas ecuaciones.

Tabla 5. Modelos de estimación del poder calorífico (HHV) de biocombustibles en basados en el análisis próximo.

Modelos
HHV = -10.8141 + 0.3133(MV+CF) (Jiménez & González, 1991)
HHV = 0.196CF + 14.119 (Demirbaş, 1997)
HHV = 0.3543CF + 0.1708MV (Cordero et al., 2001)
HHV = 0.3536CF + 0.1559MV - 0.0078Cenizas (Parikh et al.,2005)
HHV = -9.914 - 0.2324Cenizas (Sheng & Azevedo, 2005)
HHV = -3.0368 + 0.2218MV + 0.2601CF (Sheng & Azevedo, 2005)
HHV = 0.1905MV + 0.2521CF (Yin, 2011)
HHV = 19.2880 - 0.2135MV/CF - 1.9584 Cenizas/MV + 0.0234CF/Cenizas (Nhuchhen & Salam, 2012)
HHV = 20.7999 - 0.3214MV/CF + 0.0051(MV/CF) ² -11.2277Cenizas/MV + 4.4953(Cenizas/MV) ² - 0.7223(Cenizas/MV) ³ +0.0383(Cenizas/MV) ⁴ +0.0076CF/Cenizas (Nhuchhen & Salam, 2012)

HHV (poder calorífico superior); CF (carbono fijo); MV (material volátil).

Modelos basados en análisis elementales

Las ecuaciones propuestas se utilizan para calcular el poder calorífico de los biocombustibles sólidos. Estas ecuaciones se basan en los resultados de análisis que determinan la composición elemental, incluyendo carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro, oxígeno y el contenido de cenizas en el combustible. Los porcentajes de nitrógeno (N), azufre (S) y cloro (Cl) indican el impacto ambiental del uso del combustible, mientras que la proporción de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) indica su potencial energético (Nussbaumer, 2003). Existe una amplia variedad de ecuaciones desarrolladas para diferentes tipos de biomasa. Algunas de estas ecuaciones se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Modelos de estimación del poder calorífico (HHV) de biocombustibles en base al análisis elemental.

Modelos
$HHV = 0.301C + 0.525H + 0.064O - 0.763$ (Jenkins & Ebeling, 1985)
$HHV = 0.00355C^2 + 0.232C - 2.230H + 0.0512C \cdot H + 0.131N + 20.600$ (Friedl et al., 2005)
$HHV = 0.3137C + 0.7009H - 0.0318O - 1.3675$ (Sheng & Azevedo, 2005)
$HHV = 0.2949C + 0.8250H$ (Yin, 2011)
$HHV = 0.3491C + 1.1783H - 0.1034O - 0.0151N + 0.1005S + 0.0211$ Cenizas (Channiwala & Parikh, 2002)
$HHV = 0.3443C + 1.192H - 0.113O - 0.024N + 0.093S$ (Huang & Lo, 2020).

HHV (poder calorífico superior); C (carbón); H (hidrógeno); S (azufre); N (nitrógeno); O (oxígeno) y cenizas.

Conclusiones

La biomasa es un recurso energético clave dentro de las energías renovables. Al estar compuesta principalmente por tres polímeros orgánicos esenciales: celulosa, hemicelulosa y lignina es un producto de polímeros donde se entrelazan sus componentes estructurales de manera compleja, lo que le confiere su versatilidad y utilidad en diversas industrias. Por otra parte, al estarse generando constantemente se puede considerar 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 cual afecta su calidad como biocombustible. Además, puede estar influenciada por factores como el contenido de fósforo, potasio, azufre y cloro, así como la densidad en la pared celular. Al ser una estructura compleja hace que su estudio y aprovechamiento requieran un enfoque multidisciplinario.

Referencias

- Barrera-Calva, E., Martínez, G., Rosas-Cedillo, R., & Rentería-Tapia, V. (2021). Maderas de zonas áridas de México, poder calorífico por ATG-ATD y mediante bomba calorimétrica. *Madera y bosques*, 27(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732106>
- Basu, P. (2010). Chapter 2-Biomass characteristics. *Biomass gasification and pyrolysis*, 27-63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00002-7>.

- Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051-1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Ríos-Saucedo, J. C., Ruiz-García, V. M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berumen, C. A., & Núñez-Retana, V. D. (2021). Quality of pellet made from agricultural and forestry waste in Mexico. *BioEnergy Research*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Ciolkosz, D., Miller, B., & Wallace, R. (2010). Characteristics of biomass as a heating fuel. *Renewable and Alternative Energy Fact Sheet*, 1-2.
- Contreras-Trejo, J. C., Vega-Nieva, D. J., Heya, M. N., Prieto-Ruiz, J. A., Nava-Berumen, C. A., & Carrillo-Parra, A. (2022). Sintering and fusibility risks of pellet ash from different sources at different combustion temperatures. *Energies*, 15(14), 5026. <https://doi.org/10.3390/en15145026>
- Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 80(11), 1567-1571. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5)
- Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)
- Demirbaş, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science*, 30(2), 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2003.10.004>
- Demirbaş A. (2017). Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff*; 39:592–8. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798>.
- Fengel, D. & Wegener, G. (1983). *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin, New York: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110839654>

- Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., & Varmuza, K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica chimica acta*, 544(1-2), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>
- García-Quezada, J., Musule-Lagunes, R., Prieto-Ruíz, J. A., Vega-Nieva, D. J., & Carrillo-Parra, A. (2022). Evaluation of Four Types of Kilns Used to Produce Charcoal from Several Tree Species in Mexico. *Energies*, 16(1), 333. <https://doi.org/10.3390/en16010333>
- 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>
- Ioelovich, M. (2018). Energy potential of natural, synthetic polymers and waste materials-a review. *Acad. J. Polym. Sci*, 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.19080/AJOP.2018.01.555553>
- Jenkins, B., & Ebeling, J. (1985). Correlation of physical and chemical properties of terrestrial biomass with conversion: symposium energy from biomass and waste. IX IGT, 371.
- Jenkins, B. M. (1989). Physical properties of biomass. *Biomass handbook*, 860-891.
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., & Koppejan, J. (2019). Biomass combustion. *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*, 49-83.
- Jiménez, L., & González, F. (1991). Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. *Fuel*, 70(8), 947-950. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(91\)90049-G](https://doi.org/10.1016/0016-2361(91)90049-G)
- Jones, J. M., Nawaz, M., Darvell, L. I., Ross, A. B., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2006). Towards biomass classification for energy applications. In: Bridgwater, A.V., Boocock, D.G.B. (Eds.), *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, vol. 1. CPL Press, pp. 331-339.

- Kabo, G. J., Voitkevich, O. V., Blokhin, A. V., Kohut, S. V., Stepurko, E. N., & Paulechka, Y. U. (2013). Thermodynamic properties of starch and glucose. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 59, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2012.11.031>.
- Koppejan, J., & Van Loo, S. (Eds.). (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849773041>.
- 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>.
- 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).
- Nhuchhen, D. R., & Salam, P. A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>.
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & fuels*, 17(6), 1510-1521.
- Parikh, J., Channiwal, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487-494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>.
- 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>. Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M., & Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of pellets from three forest species: From raw material to end use. *Forests*, 12(4), 447. <https://doi.org/10.3390/f12040447>.

- Rinaldi, R., & Schüth, F. (2009). Design of solid catalysts for the conversion of biomass. *Energy & Environmental Science*, 2(6), 610-626.
- Rivera, J. D. D., Davies, G. M., & Jahn, W. (2012). Flammability and the heat of combustion of natural fuels: a review. *Combustion Science and Technology*, 184(2), 224-242. <http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2011.630332>.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780203492437>.
- 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>
- Shafizadeh, F., & DeGroot, W. F. (1976). Combustion characteristics of cellulosic fuels. *Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins*, 1-8.
- Shafizadeh, F. (1981). Basic principles of direct combustion. In *Biomass conversion processes for energy and fuels* (pp. 103-124). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6_6.
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and bioenergy*, 28(5), 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>.
- Tahir, M. H. N., Casler, M. D., Moore, K. J., & Brummer, E. C. (2011). Biomass yield and quality of reed canarygrass under five harvest management systems for bioenergy production. *BioEnergy Research*, 4, 111-119. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-010-9105-3>.
- Tillman, D. A. (2012). *Wood as an energy resource*. Elsevier
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

- Wang, S., & Luo, Z. (2016). Pyrolysis of biomass (Vol. 1). Walter de Gruyter GmbH & Co KG. <http://dx.doi.org/10.1515/9783110369632-002>.
- Williams, A., Jones, J. M., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2012). Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 113-137. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.10.001>.
- Yin, C. Y. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128-1132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>.

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: vrui@cieco.unam.mx*

Resumen

El uso de los biocombustibles sólidos en los diferentes sectores económicos busca generar alternativas que reduzcan la emisión de contaminantes. Los biocombustibles forman parte de las energías renovables, que hasta el momento tienen una participación mínima en los energéticos utilizados a nivel nacional. El monitoreo de emisiones es una parte esencial para garantizar la reducción de gases de efecto invernadero en el ambiente, mejorar la calidad del aire intramuros y evitar la exposición a contaminantes. Existen analizadores de gases portátiles y fijos, protocolos de medición, normas y estándares que permiten realizar campañas de

monitoreo y evaluación en laboratorio y campo, con el fin de regular tecnologías en el mercado nacional, evitar muertes prematuras por la inhalación de humo y contribuir a reducir el aumento de la temperatura global que está provocando sequías, desplazamiento de la biodiversidad y derretimiento de los casquetes polares. Se tienen capacidades y experiencia en México para evaluar y monitorear el uso de biocombustibles sólidos alternos, como pellets, briquetas, carbón vegetal, biomasa torrefactada y astillas, lo que permitirá detonar de una manera regulada mercados locales y regionales.

Palabras clave: analizadores de flujo de gases, mediciones en laboratorio y campo, calidad del aire, exposición, gases de efecto invernadero.

Usos de los biocombustibles sólidos en los sectores residencial, comercial e industrial

El uso de los combustibles para generar electricidad y calor es parte de las necesidades cotidianas de la población, parte de esos combustibles son sólidos y renovables. Por ejemplo, la leña, que es un biocombustible que se obtiene de los bosques y su uso se ha adoptado desde hace siglos en el sector residencial para cocinar, calentar los espacios de la vivienda, calentar agua e incluso ahumar alimentos (Ruiz-García et al., 2021). Para el sector residencial, el carbón vegetal es otro biocombustible sólido de gran importancia. Actualmente, existen propuestas de biocombustibles sólidos emergentes como los pellets y briquetas, estos biocombustibles son elaborados con residuos de la industria agrícola y forestal – como el aserrín,

el rastrojo, y las cascaras y huesos de frutos -y consiste en un proceso de prensado de los residuos para generar pequeños cilindros que después pueden ser combustionados para generar calor (Musule et al., 2021), y en procesos más complejos, utilizar ese calor para después generar electricidad (Tauro et al, 2018) (ver Figura 1). El caso del sector comercial no es muy diferente del residencial respecto a las tareas en las que se usan los biocombustibles, existen comercios dedicados al asado con carbón, al horneado de pan y la cocción de tortillas con leña, solo por mencionar algunos. Para el sector industrial, sobre todo de pequeña escala, existen actividades dedicadas a la producción de destilados como los alambiques que utilizan leña en la elaboración del mezcal, hornos de carbón vegetal en la alfarería y en la fundición de metales y vidrio, hornos para cocción de ladrillo que utilizan astillas y residuos de la industria maderera, e incluso los hornos de producción de carbón vegetal a partir de la leña.

El utilizar los biocombustibles sólidos soluciona necesidades básicas de la población, y ayuda a generar y mantener los mercados locales. Sin embargo, el uso de los biocombustibles sólidos tiene una relación muy estrecha con las tecnologías en las que se utiliza, lo que genera abundantes o nulas cantidades de contaminantes, mejor conocidas como emisiones.



Figura 1. Biocombustibles, a la izquierda rastrojo de podas agrícolas, al centro leña de encino, y a la derecha pellets de aserrín.

Tipos de contaminantes generados

Los contaminantes emitidos por la combustión de los biocombustibles sólidos pueden dividirse en gases y aerosoles (partículas de formas variables que contienen gases, humedad y materia sólida). Los principales productos de la combustión ideal, son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), pero por la falta de calor y oxígeno, la reacción de combustión se realiza de manera incompleta generando variantes de la molécula de CO_2 , como el monóxido de carbono (CO) y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$), conocido comúnmente como hollín. Incluso, existen otros casos donde las moléculas de combustible no se rompen por completo, lo que genera contaminantes gaseosos como el metano (CH_4) o hidrocarburos de cadena corta (C_xH_x). La mayoría de los contaminantes gaseosos generados tienen propiedades para calentar la atmosfera, por ejemplo, el CO_2 que permite

mantener condiciones adecuadas de calor en el planeta para que la vida se mantenga. Si no existiera CO_2 en nuestra atmosfera, el planeta tierra estaría congelado. El problema con el CO_2 consiste en que las concentraciones de esta molécula están aumentando por las diferentes actividades económicas del ser humano, principalmente por el uso de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón mineral. Referente al resto de los contaminantes que también calientan la atmosfera, sus aportaciones son mucho mayores que la del CO_2 , por ejemplo, una molécula de CH_4 equivale a 28 de CO_2 , y una molécula de carbono negro (CN) a 680 de CO_2 . Esto representa que existen contaminantes que aún en pequeñas cantidades, generan impactos importantes en el calentamiento global del planeta (Serrano-Medrano et al., 2018). Las emisiones producidas por el uso de combustibles y biocombustibles deben medirse para regular los impactos en el medio ambiente. Este tipo de contaminantes, pueden mantenerse en la atmósfera por años, algunos por 25 años y otros hasta por 100 años. El metano y el carbono negro, son conocidos como contaminantes de vida corta, lo que significa que al mitigar este tipo de contaminantes se contribuye de manera importante para frenar el cambio climático (Quiñones-Reveles et al., 2021).

¿Cómo se medir las emisiones?

Para medir las emisiones, existen diversos equipos de medición, algunos equipos se pueden llevar a campo para evaluar los biocombustibles y las ecotecnologías que los utilizan. Tal es el caso de analizadores de flujos de gases portátiles, estos equipos son pequeños y cuentan con sensores

integrados para medición de contaminantes gaseosos, los sensores se calibran para asegurar lecturas correctas, y al final de su vida útil, se reemplazan por unos nuevos. Algunos de estos equipos cuentan con sondas metálicas que pueden ser introducidas en las chimeneas por donde salen los gases o directamente en las cámaras de combustión, pero aplica solo para aquellas sondas que sean capaces de soportar temperaturas cercanas a los 1000°C. 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 como helio, oxígeno o nitrógeno para poder encenderlos y 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, que es palabras sencillas 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 las moléculas más grandes, lo que permitirá separar los contaminantes gaseosos en función del tamaño de su molécula, en donde los contaminantes de moléculas pequeñas saldrán primero, mientras que las de mayor tamaño saldrán al final. Cada molécula saldrá a diferente tiempo, esos tiempos son conocidos como tiempo de residencia, y son muy importantes para identificar una molécula o contaminantes en particular, o un conjunto de contaminantes. Otro ejemplo de equipo instalado y operado exclusivamente en laboratorio, es el analizador de Carbono Elemental (EC), cuya función consiste en combustionar bajo condiciones perfectas de oxígeno y calor, el

hollín capturado en filtros de muestreo, para luego medirlo como CO_2 , mediante un analizador de gases (Ruiz-García et al., 2022).

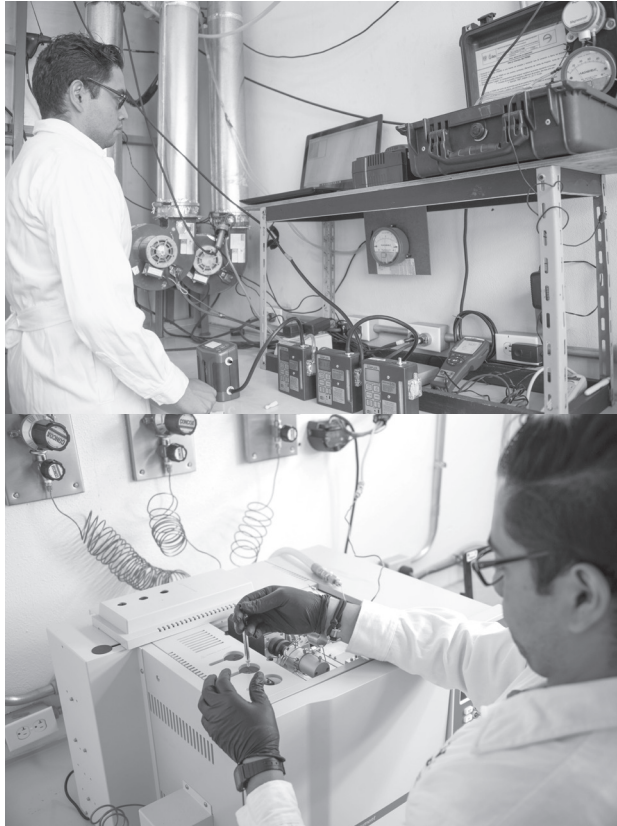


Figura 2. Equipos para medición de emisiones. A la izquierda un conjunto de analizadores de flujo de gases y a la derecha un cromatógrafo de gases.

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_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Por medio de un ciclón y variaciones en

el flujo de muestreo, es posible seleccionar el tamaño de partícula, incluso, en investigaciones recientes, los diámetros de partícula con mayores impactos en la salud son los $PM_{1.0}$ y menores. La captura de material particulado en filtros es conocida como método gravimétrico, y consiste en tomar muestras pequeñas de contaminantes 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 producido. Los filtros que se utilizan para capturar el hollín son de diversos tamaños y materiales. Existen filtros de cuarzo que son capaces de soportar temperaturas de $900^{\circ}C$ y son los que se utilizan en los análisis de determinación de EC, mientras que filtros de fibra de vidrio y cuarzo puede ser utilizados en mediciones de CN, y por otro lado, existen filtros de polietileno, usados en estudios de salud para conocer el hollín que respira la población, pero con la limitante de que no pueden ser usados en análisis posteriores con altas temperaturas (ver Figura 3).



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

Los equipos ya sean portátiles o exclusivos para laboratorio, deben tener mantenimientos menores periódicos, y mayores en función de sus años de vida útil. Lamentablemente, existe una dependencia de fabricantes extranjeros de equipo, lo que provoca que la adquisición, las capacitaciones y los mantenimientos de equipos de medición de gases, sea costosa. 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), con capacidades e infraestructura únicas para realizar mediciones de biocombustibles y ecotecnologías energéticas, también se tiene al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), que cuenta con el liderazgo para realizar inventarios de emisiones regionales y nacionales, y al Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) enfocada en contaminantes gaseosos con impactos a la salud.

Impactos a la salud

Las emisiones impactan al ambiente, contribuyendo al calentamiento global, pero también afectan la calidad del aire, afectando la salud de la población y de los usuarios de los combustibles. Actualmente, existe una necesidad global de reducir las muertes por inhalación de humo. La población expuesta contrae enfermedades respiratorias, pierde años de vida saludable, y consume sus recursos económicos en la compra de medicamentos y tratamientos. Para monitorear este tipo de contaminantes, existen monitores de la calidad del aire ambiental, intramuros y personales. El aire ambiente es aquel que se encuentra en el exterior, mientras que el intramuros es el que se refiere al interior de vivienda, de los lugares de trabajo, de estudio y recreación. Los equipos de medición personal miden los contaminantes a los que los usuarios están expuestos, estos equipos las personas los llevan consigo a una altura cercana a la nariz, para capturar y medir contaminantes. Existen estaciones de monitoreo del aire colocadas en las comunidades y en las ciudades, las cuales permiten realizar un monitoreo de la calidad del aire continua durante todo el año, mientras que equipos de contaminación intramuros y de exposición, se colocan por periodos de 24 y 48 horas. El monitoreo de contaminantes gaseosos, permite conocer los beneficios o impactos que tiene la población por fuentes de contaminantes cercanas y/o por el reemplazo de nuevas tecnologías. Estudios realizados, muestran que el uso adecuado de biocombustibles cumple con los lineamientos de 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).

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, se carece de esta información, la política pública está enfocada al uso de combustibles fósiles, y detalla las emisiones en fuentes 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 fugitivas, en la chimenea y totales, las tasas de emisión máximas permitidas, los equipos pertinentes para la medición y extracción de gases (Economía, 2018). Para el caso de las emisiones fugitivas, es un término acuñado en México y representa aquellos gases que no son capaces de ventilarse por la chimenea y que quedan en el cuarto de cocinado debido a fugas en la cámara e combustión o imperfecciones en la estufa. En su momento, desde México, se planteó la manera adecuada de medir

emisiones fugitivas, que eran emisiones que no se incluían en protocolos o normativas 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 de diversos sectores, los cuales que han sido evaluados en muy pocas ocasiones, por ejemplo, el sector comercial residencial rural y periurbano, el comercial y el industrial con enfoque en la pequeña escala (Figura 4).

Existen algunos estudios realizados sobre emisiones de biocombustibles, algunos enfocados a gases de efecto invernadero y otra calidad del aire intramuros. Las conclusiones de estos estudios son que deben utilizarse en paralelo tanto ecotecnologías como biocombustibles de calidad. El usar biocombustibles con humedades inferiores al 10% y con un contenido de cenizas menor al 2%, permite que la reacción de combustión mejore, disminuyendo contaminantes. Por otro lado, el uso de aislantes en las cámaras de combustión de las tecnologías ayuda a almacenar mayor cantidad de calor y beneficia la combustión para que se lleve a cabo a mayores temperaturas. Ecotecnologías con chimenea usadas en 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). Respecto al ambiente, los biocombustibles son renovables, por lo que las

emisiones de CO_2 están consideradas dentro del ciclo del carbono, es decir, la biomasa con fines energéticos se vuelve un combustible, al combustionarse se vuelve CO_2 , que después es transformado por la vegetación mediante el proceso de fotosíntesis para incorporar al Carbono (C) en su estructura para poder crecer y liberar el Oxígeno (O_2) a la atmosfera.



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 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. 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>.
- 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>.

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

La termografía es una herramienta que puede ser útil para analizar biocombustibles de tipo sólido en diversas etapas de su ciclo de producción uso y/o combustión, proporciona información sobre la temperatura y las variaciones térmicas en las muestras a combustionar principalmente, lo que puede ayudar a mejorar la calidad, la eficiencia y la seguridad en la utilización de estos combustibles renovables; sin embargo, es importante combinar la termografía con otras técnicas de análisis para obtener una comprensión más completa de los aspectos relacionados con los biocombustibles sólidos, esta técnica puede ser valiosa para evaluar la calidad. eficiencia y comportamiento de estos materiales en aplicaciones de

generación de energía térmica, ya que ayuda a optimizar los procesos de combustión, mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales, contribuyendo así al desarrollo sostenible de fuentes de energía renovable, ya que esta técnica proporciona imágenes termográficas para estudiar y evaluar las propiedades térmicas y la calidad de los biocombustibles en estado sólido, es útil para determinar la uniformidad de la distribución de la temperatura, la eficiencia de combustión, la identificación de impurezas, permitiendo evaluar de forma valiosa la calidad, eficiencia y seguridad de los procesos de combustión de estos biocombustibles sólidos derivados de la biomasa lignocelulósica, es así que la termografía es una herramienta valiosa para el análisis de biocombustibles sólidos, ya que permite visualizar y comprender mejor los patrones de distribución de temperatura durante la combustión y otros procesos térmicos, esto puede ayudar a mejorar la eficiencia y la calidad de los biocombustibles y los sistemas de combustión.

Introducción

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).

En la termografía, se utiliza una cámara termográfica (o termocámara) que es capaz de capturar la radiación infrarroja y convertirla en una imagen

visible, la imagen resultante muestra diferentes colores o tonos que representan las variaciones de temperatura en la superficie del objeto o área que está siendo inspeccionada, las áreas más calientes suelen representarse en colores más brillantes (como rojo o blanco), mientras que las áreas más frías se representan en colores más oscuros (como azul o negro) véase Figura 1. (Balageas, 2007).

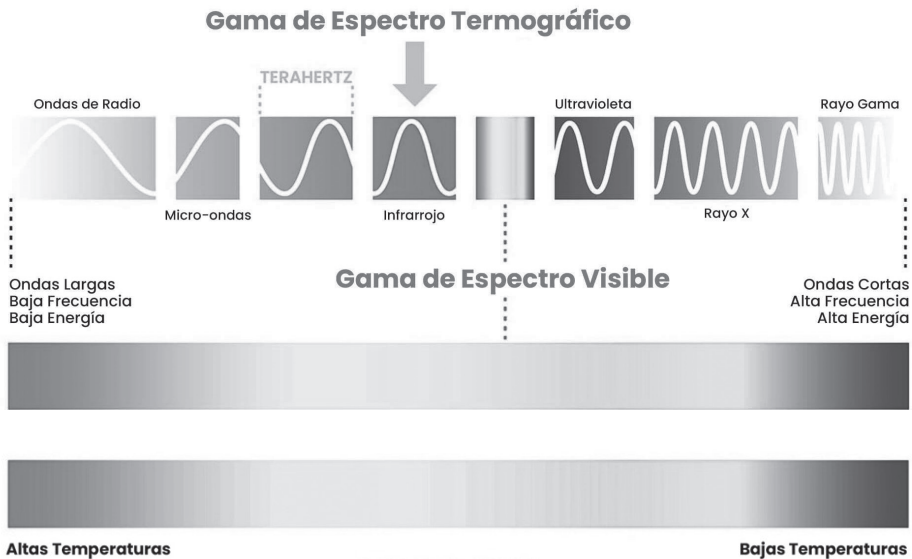


Figura 1. Imagen de colores emitida en la medición a través de una cámara termográfica

La aplicación de esta técnica puede ser utilizada en los biocombustibles sólidos (BCS), los cuales se derivan de materiales orgánicos, como la biomasa, y se utilizan para generar energía térmica o eléctrica, aplicando la termografía en este tipo de materiales (sobre todo en la etapa de

combustión), puede resultar en una herramienta de combinación valiosa para investigar y monitorear diversos aspectos de los biocombustibles sólidos (Morales-Máximo et al., 2018).

El análisis termográfico en biocombustibles sólidos aplicando esta técnica se refiere al uso de la termografía para generar una imagen térmica, con el fin de evaluar la calidad, eficiencia y comportamiento de los biocombustibles sólidos, visualizando y evaluando los patrones de distribución de la temperatura en superficies o sistemas, con el fin de identificar irregularidades, zonas de calor o frío anormales, y evaluar la eficiencia térmica, esta técnica puede ser particularmente útil en la caracterización de biocombustibles sólidos, ya que puede proporcionar información valiosa sobre su comportamiento durante la combustión o procesos térmicos, ya que se basa en la detección de radiación infrarroja emitida por los objetos en función de su temperatura, los biocombustibles sólidos, como la madera, los pellets de biomasa o los residuos agrícolas, tienen características térmicas específicas que pueden ser analizadas mediante la termografía (Morales-Máximo et al., 2020).

Características y aplicaciones

La termografía es una técnica de imágenes térmicas que permite visualizar las diferencias de temperatura en una superficie o en un objeto, cuando se aplica a la investigación y análisis de biocombustibles sólidos derivados de la biomasa lignocelulósica para la generación de bioenergía, puede proporcionar información valiosa sobre diversos aspectos relacionados con

su proceso de producción, almacenamiento y uso, ya que puede ayudar a la detección de puntos calientes y fríos, ya que detecta áreas de alta o baja temperatura en la superficie de los biocombustibles sólidos; estos puntos calientes o fríos pueden indicar problemas de calidad en el material, como una distribución desigual de humedad, densidad o contenido de impurezas, identificar estos problemas temprano puede contribuir a mejorar la eficiencia del proceso de producción (Morales-Máximo et al., 2018).

Por otra parte para lo cual nos puede apoyar la termografía es para el control de la temperatura en procesos de secado y producción; los biocombustibles sólidos a menudo requieren procesos de secado y producción que involucran cambios de temperatura, la termografía puede ser utilizada para monitorear la temperatura en diferentes etapas de estos procesos y asegurarse de que se mantengan dentro de rangos óptimos, esto puede mejorar la calidad del biocombustible resultante y evitar problemas como la degradación térmica no deseada. Ya que durante el almacenamiento y manipulación de biocombustibles sólidos, es importante controlar la temperatura para evitar riesgos de ignición espontánea o degradación, la termografía puede proporcionar una imagen rápida y en tiempo real de la temperatura superficial de grandes volúmenes de material, permitiendo identificar áreas problemáticas que requieran atención (Steen et al., 2012).

Además puede utilizarse para detectar irregularidades en los biocombustibles sólidos durante su fabricación, por ejemplo, se pueden identificar zonas frías o calientes en una muestra de biomasa que indiquen

problemas de densidad, humedad o contenido energético desigual, ya que esta humedad es un factor crítico en los biocombustibles sólidos, ya que afecta directamente su poder calorífico y eficiencia, la termografía puede ayudar a identificar áreas con mayor humedad en una muestra de biomasa, pero si se detecta a tiempo puede ayudar a ajustar los parámetros del proceso y mejorar la calidad del biocombustible resultante lo que puede influir en la calidad y el rendimiento del biocombustible (Gomez-Heras et al., 2013).

Aplicando esta técnica a los BCS, se puede hacer la detección de problemas de combustión, como la quema de pellets, briquetas y la misma leña utilizada para tareas de cocinado en distintas comunidades rurales de México, utilizando estufas o calderas, la termografía puede ser usada para monitorizar la combustión, ya que puede identificar puntos calientes o fríos en el lecho de combustión, lo que puede indicar problemas como una distribución irregular del biocombustible o una mala combustión. Por otra parte esta técnica puede ayudar a evitar problemas de degradación y humedad en el almacenamiento a largo plazo de BCS, ya que la termografía puede ser utilizada para monitorear las temperaturas en los lugares de almacenamiento, esto puede ayudar a identificar áreas donde la temperatura es excesivamente alta, lo que podría afectar la calidad del combustible. Por ultimo en cuestión de investigación, la termografía puede utilizarse para estudiar los procesos de descomposición térmica de los biocombustibles sólidos, lo que puede proporcionar información sobre su composición y

comportamiento bajo diferentes condiciones (Morales-Máximo, López-Sosa, & Rutiaga-Quiñones, 2018).

La operación de estas cámaras debe de ser de mucho cuidado y especializada, ya que la calidad de la imágenes dependerá de una buena configuración de la cámara termográfica, la selección una cámara termográfica adecuada para la aplicación, debe tener una resolución suficiente para captar detalles pequeños y poder ajustar la sensibilidad térmica según las características del biocombustible, la cámara debe ser calibrada correctamente antes de comenzar la captura de imágenes, la realización de la captura de imágenes termográficas en diferentes etapas del proceso térmico, como la ignición, la combustión y la fase de cenizas, podrían asegurar que las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.) sean controladas y registradas, ya que pueden afectar las mediciones (Amon et al., 2008).

El procesamiento y análisis de las imágenes, se debe de utilizar software de procesamiento de imágenes termográficas para analizar los datos recopilados, lo cual puede ayudar a identificar patrones de distribución de temperatura, zonas calientes o frías anormales, gradientes de temperatura, entre otros. Las imágenes termográficas se presentan en forma de paletas de colores (ver Figura 2), donde cada color representa una temperatura específica.

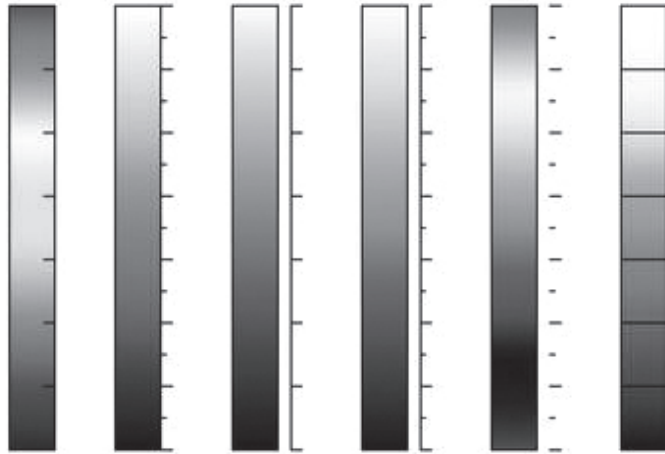


Figura 2. Patrones de distribución en colores de con respecto al utilizar una cámara termográfica

Como se muestra en la imagen anterior, la interpretación de los resultados es crucial, ya que al Identifica cualquier anomalía o comportamiento inusual en la distribución de temperatura, estas irregularidades podrían indicar problemas en la calidad del biocombustible, la eficiencia de la combustión o la distribución del calor en el sistema (ver Figura 3).

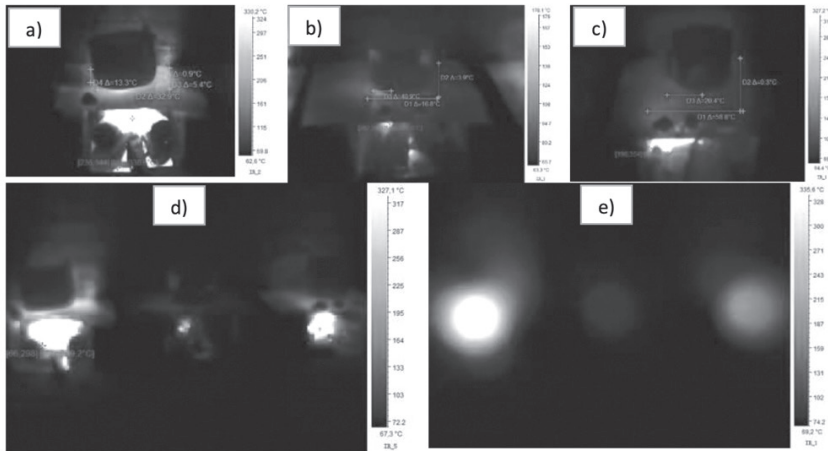


Figura 3. Distribución y medición de la termografía en diferentes tiempos con su respectiva emisión de energía: a) Punto de análisis 1, b) Punto de análisis 2, c) Punto de análisis 3, d) Punto de análisis 4, e) Punto de análisis 5,

Como se muestra en la imagen anterior, 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 si, la termografía puede ser utilizada para detectar variaciones en la calidad y la uniformidad de los biocombustibles sólidos durante la producción, las diferencias en la composición, densidad y humedad pueden manifestarse como patrones térmicos distintivos en las imágenes termográficas, esto puede ayudar a identificar problemas en la formación de los biocombustibles y permitir ajustes en el proceso para mejorar la calidad. Junto con el acompañamiento y monitorización de la combustión, en aplicaciones donde se queman biocombustibles sólidos, como en calderas o estufas, 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).

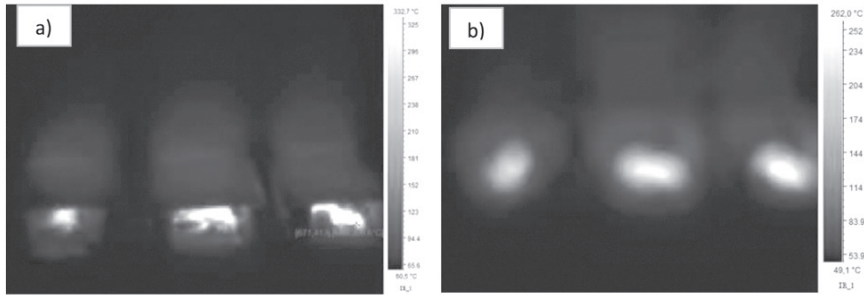


Figura 4. Análisis de la combustión con diferentes enfoques de la cámara termográfica: a) Difuminación mínima, b) Difuminación máxima

Conclusión

La termografía es una técnica de imagen que permite medir y visualizar la radiación infrarroja emitida por un objeto, lo que puede proporcionar información valiosa sobre su temperatura y distribución térmica, en el contexto de los biocombustibles sólidos, la termografía puede ser utilizada para llevar a cabo un análisis detallado de diferentes aspectos relacionados con la producción, almacenamiento y uso (combustión) de estos combustibles derivados de la biomasa lignocelulósica.

Este análisis nos puede proporcionar o documenta los hallazgos a través de un informe detallado, ya que las imágenes que puede proporcionar esta técnica hacen una descripción detallada de las condiciones de prueba, análisis de resultados y conclusiones, y si es necesario, sugiere recomendaciones para optimizar el proceso térmico o mejorar la calidad del biocombustible.

Además, puede ser una herramienta útil en la investigación y desarrollo de nuevos tipos de biocombustibles sólidos, ya que permite evaluar la eficiencia de la combustión, la liberación de calor y otros aspectos térmicos que son cruciales para el rendimiento del combustible.

Asimismo, hay que recordar que la interpretación de las imágenes termográficas puede requerir experiencia y conocimientos especializados, de esto dependerá que el análisis sea verídico o con menores errores, así mismo las condiciones ambientales, como la temperatura ambiente, la humedad y la radiación solar, también pueden influir en las mediciones termográficas, por lo que es necesario considerar estos factores al analizar los resultados. Por lo tanto, es crucial establecer protocolos de medición y análisis consistentes para obtener resultados confiables y significativos.

Referencias

- Amon, F., Hamins, A., Bryner, N., & Rowe, J. (2008). Meaningful performance evaluation conditions for fire service thermal imaging cameras. *Fire Safety Journal*, 43(8), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.12.006>
- 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.i

3.08

- 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-4f08-9f33-20f2fa3483db/content>
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. . (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M, Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Pintor-Ibarra, L. ., & Rutiaga-Quiñones, 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>
- Morales-Máximo, Mario, López-Sosa, L. B., Correa-Boyzo, J. M., Flores-Rojas, E. A., & García-Bustamante, C. G. (2018). ANÁLISIS TÉRMICO COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS SOLARES PARA EL SECADO DE MADERA CON INCLINACIÓN VARIABLE. *Semana Nacional de Energía Solar, VLII*.
- Morales-Máximo, Mario, López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. G.

(2018). Evaluación termografica de la combustión de briquetas con aglomerante variable de residuos maderables de pino: Análisis comparativo en fogones tradicionales del estado de Michoacán. *Semana Nacional de Energía Solar*, *XVLL*(2448–5543), 439–444. <https://www.researchgate.net/publication/333561438>

Steen, K. A., Villa-Henriksen, A., Therkildsen, O. R., & Green, O. (2012). Automatic detection of animals in mowing operations using thermal cameras. *Sensors (Switzerland)*, *12*(6), 7587–7597. <https://doi.org/10.3390/s120607587>

Capítulo 12: Sustentabilidad de los biocombustibles sólidos

Carlos A. García

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

La sustentabilidad en los biocombustibles sólidos se trata de garantizar que la producción y el uso de estos biocombustibles sean beneficiosos tanto para el medio ambiente como para la sociedad, al tiempo que se reduce la dependencia de los combustibles fósiles y se promueve una fuente de energía renovable y limpia; sustentabilidad en los biocombustibles sólidos implica la gestión responsable de los recursos naturales, la minimización del impacto ambiental, la consideración de aspectos sociales y económicos, y la búsqueda constante de mejoras tecnológicas para asegurar que estos combustibles sean una alternativa renovable y limpia, además de un equilibrio entre la producción de biomasa, la eficiencia energética, la reducción de emisiones, la protección del medio ambiente y el bienestar de las comunidades locales. La adopción de prácticas y políticas sustentables

es esencial para garantizar que estos biocombustibles contribuyan de manera positiva a la mitigación del cambio climático y a la preservación de los recursos naturales.

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.

Se espera que los BCS tomen un papel cada vez más importante en los sistemas energéticos de los países debido a la versatilidad que éstos presentan, como la generación de potencia base, crucial para reducir la variabilidad de otras fuentes renovables de energía (REN21, 2022), así como por su potencial para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero. Algunas proyecciones consideran que el uso de BCS mantenga un crecimiento en las llamadas aplicaciones modernas, donde se ha reportado un crecimiento promedio anual de 2.7% para demandas de calor y 5.1% para la generación eléctrica (WBA, 2019).

Los BCS son variados en cuanto a su origen, transformación y sus usos finales. En la Tabla 1 se presenta una tipología de los BCS.

Tabla 1. Tipos de biocombustibles sólidos.

Biocombustible sólido (BCS)	Origen	Sectores de uso
Leña	Forestal	Residencial
Carbón vegetal	Forestal	Residencial/Industrial
Residuos del bosque y de la industria forestal	Forestal	Industrial/Eléctrico
Pellets y briquetas	Forestal/Agrícola	Industrial/Eléctrico
Residuos agrícolas y agroindustriales	Agrícola/Industrial	Industrial

Esta oportunidad de una ampliación en 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

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.

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).

Los retos a la sustentabilidad también varían dependiendo del origen de la biomasa, sus procesos de transformación y sus usos finales. Por ejemplo, la biomasa que es un residuo de procesos agroindustriales o del aserrío, como las astillas, tienen menores impactos ambientales que la biomasa que proviene de plantaciones energéticas, es decir, plantaciones específicas de las cuales la biomasa obtenida se empleará para usos energéticos (WBGU, 2009).

En este capítulo se presentan algunos impactos a la sustentabilidad para los diferentes BCS. La tipología mostrada en la Tabla 1 servirá de base para la revisión de los impactos a la sustentabilidad de cada uno de los BCS. Cabe señalar que esta revisión no pretende ser exhaustiva, el objetivo es mostrar un panorama general de los impactos tanto positivos como negativos de cada BCS. Los BCS mostrados se limitan a los que se ha documentado tienen aplicación u oportunidades de uso en el sector energético mexicano.

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 las aplicaciones modernas.

Leña

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 (IEA et al., 2020). 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; ESMAP, 2020). Los dispositivos empleados tradicionalmente tienen también desventajas en términos de daños a la salud, esto debido a que los gases 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. Se estiman entre 1.8 a 4 millones de muertes prematuras al año a nivel global por estas prácticas (Ahmed et al., 2022; IEA, 2020), las cuales alcanzarían pérdidas anuales por 1.4 billones de dólares (ESMAP, 2020).

Para paliar los efectos por el uso ineficiente de la leña, se ha propuesto el cambio a tecnologías que hagan uso de combustibles más limpios, como el etanol, el biogás o los pellets forestales, todos ellos provenientes de la

biomasa, pero también de otras fuentes de energía como la electricidad o el gas LP. No obstante, estas formas de energía no siempre son adecuadas para los contextos rurales donde se emplea mayormente la leña. Por ejemplo, el gas LP presenta altos costos para adquirir las estufas, el combustible es costoso y presenta una alta variabilidad en su precio, lo cual es una desventaja ya que en el medio rural los ingresos son generalmente irregulares. De igual forma, los aspectos culturales también juegan un papel importante, por ejemplo, aun con la presencia de tecnologías como estufas de gas LP en hogares, el uso de leña fogones no se abandonan con el propósito de preparar alimentos tradicionales (Berrueta et al., 2017; Serrano-Medrano et al., 2018). Por lo anterior, se ha buscado mantener el uso de la leña por medio de tecnologías más eficientes, que permitan también desalojar el humo del interior de las cocinas. Estas tecnologías son variadas y tienen distintos grados de emisiones (Gill-Wiehl y Kammen, 2022), 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, generalmente escasos en los contextos rurales, o bien, permiten destinar menor tiempo para la recolección de la leña (Berrueta et al., 2017; García-Frapolli et al., 2010). Incluso, los programas para la implementación masiva de estufas ecológicas, tiene un potencial interesante para mitigar gases de efecto invernadero con costos de mitigación negativos (García et al., 2015; Serrano-Medrano et al., 2018).

Carbón vegetal

El carbón vegetal es usado ampliamente por los restaurantes, vendedores de comida y en algunos hogares. Generalmente el carbón vegetal se percibe como un problema ambiental, principalmente en términos de deforestación y degradación de los bosques (debido a que el carbón vegetal se produce a partir de la madera de los bosques naturales), donde la deforestación es la pérdida de cubierta forestal y la degradación se refiere a la reducción temporal o permanente en la densidad, estructura, composición de las especies y productividad de la cubierta vegetal (Chidumayo y Gumbo, 2013). También se reportan afectaciones en el suelo en los sitios de producción, cuando el carbón vegetal se produce en hornos de tierra, como una reducción en su densidad y albedo, mayor porosidad y temperatura; así como impactos en los servicios ecosistémicos como la regulación de los flujos de agua, secuestro de carbono, protección del suelo contra la erosión y hábitat para las especies silvestres (Chidumayo y Gumbo, 2013).

Por otra parte, Sacramento-Rivero et al. (2022) analizaron una empresa de producción de carbón vegetal en México, donde empleando una metodología específica para evaluar la sustentabilidad de BCS, y mediante el método de Análisis de Ciclo de Vida² para calcular algunos indicadores, el carbón vegetal presentó impactos negativos como altas emisiones de material particulado durante su producción, una importante cantidad de

² El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología para evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio durante todas las etapas de su vida. La metodología está establecida en las normas ISO 14040/14044.

empleo informal, bajo nivel de educación de los trabajadores que lo producen, y una brecha de género importante (Sacramento-Rivero et al., 2022). 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.

El carbón vegetal cuenta también con posibilidades para contribuir positivamente a nivel socioeconómico, ya que, si este es producido a partir de bosques manejados y con tecnologías de conversión más eficiente, puede generar cadenas de valor y empleos en el sector rural, además de contar con un potencial para mitigar gases de efecto invernadero (Johnson et al., 2009).

El carbón vegetal también presenta la oportunidad de usarse para la cogeneración eléctrica haciendo uso de nuevas tecnologías, lo cual puede permitir la diversificación e incremento en ingresos en áreas rurales, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y capacidad adicional de energía renovable (Carneiro de Miranda et al., 2013). Cabe señalar que no hay un consenso en cuanto al desempeño de la producción y uso de carbón vegetal en relación con el cambio climático, ya que algunas fuentes reportan aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción y en el aprovechamiento del carbón vegetal (Musule et al., 2022a). En buena medida el potencial de mitigación depende de si

existe una explotación forestal sustentable, como el manejo sustentable de bosques, y de las tecnologías de conversión.

Residuos del bosque y de la industria forestal

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 (Álvarez-Godoy et al., 2001). Al igual que ocurre con otros residuos orgánicos, su acumulación puede provocar lixiviación (Beaumont-Roveda, 1994).

Por otra parte, Musule et al (2022a) realizaron una revisión de los impactos en el ciclo de vida del aprovechamiento de BCS, entre los que se incluyen los residuos de los bosques y la industria forestal. Los resultados mostraron que en general los sistemas de aprovechamiento de estas biomásas permiten mitigar emisiones de gases de efecto invernadero comparados con los combustibles fósiles en aplicaciones residenciales e industriales.

De forma similar, se reporta un estudio de caso en Durango, México, en donde se evalúa el uso los residuos de pino que provienen de un aserradero para la generación de calor. Los resultados mostraron una tasa de retorno energético positiva de alrededor de 4.3, es decir, por cada unidad de energía demandada para la obtención y el uso de los BCS, estos proporcionaban 4.3

unidades de energía (Anaya-Reza, 2021). El uso de BCS mostró también menores impactos que el uso de combustóleo para generación de calor en las categorías de Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua marina, emisiones de CO₂, acidificación y la formación de ozono fotoquímico, en tanto que muestra mayores impactos en la eutrofización (por la carga orgánica que provoca la descomposición de la biomasa).

En cuanto a los impactos socioeconómicos, el aprovechamiento de BCS permiten la creación de empleos y de ingresos en zonas rurales (Masera y Sacramento-Rivero, 2022).

Pellets y briquetas

Los pellets y las briquetas son combustibles de biomasa densificada que presentan ventajas en cuanto a su densidad energética y facilidad de transporte y uso (Tauro et al., 2018).

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); en tanto que 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 (Cowie et al., 2021).

Por otra parte, la combustión de los pellets puede provocar emisiones al aire superiores a la quema de combustibles fósiles como el gas LP, principalmente de material particulado (Musule, 2021b). Así mismo, el uso de pellets para calefacción puede provocar el aumento de impacto de eutrofización con respecto a combustibles fósiles (Musule et al., 2021b).

En el ciclo de vida se reportan emisiones de CO₂ y de metano en la etapa de almacenamiento de la materia prima para la fabricación de pellets (madera astillada, aserrín, virutas y cortezas), esto por la descomposición de esta biomasa apilada. De hecho, un estudio reportó que las emisiones gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de la producción y uso de pellets para generación eléctrica sobrepasan las emisiones de la electricidad producida con carbón mineral (Röder et al., 2015). Lo anterior debido a las emisiones de metano de la biomasa almacenada para la producción de pellets cuando esta biomasa alcanza los cuatro meses de almacenamiento.

En el ciclo de vida se reportan emisiones menores de gases de efecto invernadero para aplicaciones residenciales e industriales Musule (2022a, 2022b). En el caso de la aplicación de pellets para calefacción a nivel

residencial, se reporta mitigación de gases de efecto invernadero si se compara con el gas LP, la electricidad del mix eléctrico mexicano.

También se ha señalado el potencial de mitigación de gases de efecto invernadero de la aplicación de pellets forestales en el sector industrial mexicano para la generación de calor, donde se calculó un potencial de mitigación acumulada para 20 años de 84 MtCO₂e, con un costo de mitigación de -7 USD/tCO₂e (García et al., 2012). Por su parte Tauro et al. (2018) señalan un potencial de mitigación de gases de efecto invernadero para el sector eléctrico mexicano de 18% si se emplean pellets para la generación eléctrica.

En cuanto a otros beneficios socioeconómicos, Morales-Maximo et al. (2020, 2023) documentaron el potencial de los residuos de los talleres artesanales de madera de una comunidad en Michoacán para producir briquetas y satisfacer necesidades energéticas al emplearse como BCS. El uso de estos combustibles, de acuerdo con los autores, permitiría ahorrar hasta 600 dólares estadounidenses al año (el equivalente al ingreso de varios meses), además de brindar ahorro de tiempo para recolectar leña. De igual forma se pueden obtener beneficios a la salud por la reducción de emisiones al aire en las cocinas de los hogares si las briquetas se emplean en estufas ecológicas (Morales-Máximo et al., 2023).

Residuos agroindustriales

En cuestiones sociales, se ha documentado que el uso de bagazo de caña de azúcar, un subproducto de la producción de azúcar puede emplearse en calderas eficientes para la cogeneración. En estos casos se reporta que el uso eficiente del bagazo tiene un potencial de generar el doble de empleos por cada GWh producido con respecto a la generación con sólo combustóleo en los ingenios azucareros, y hasta 20 veces con respecto a la generación eléctrica de la matriz de generación en México (Manzini et al, 2021). En este mismo sentido, Tauro et al. (2023) señalan el potencial para la generación de nuevas fuentes de ingreso a partir de la venta de residuos de la poda de los árboles de aguacate.

En la dimensión económica, el aprovechamiento de las cascaras de naranja, la paja y el bagazo de caña de azúcar, tendría mejor rentabilidad económica, evaluada a partir de la técnica del Valor Presente Neto, con respecto al uso de combustóleo en aplicaciones para la generación de calor y electricidad. (Manzini et al., 2021; Navarro et al, 2021).

Los residuos agrícolas como BCS 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 (Navarro et al., 2021; Ordoñez-Frías et al., 2020), lo que provoca que se descompongas y emitan metano (Navarro et

al. 2021); además esta biomasa residual puede producir lixiviados que afectan la calidad del agua (Killi et al., 2014). El aprovechamiento de los residuos señalados permitiría eliminar o mitigar estos impactos.

En cuanto a los impactos ambientales evaluados a partir del Análisis de Ciclo de Vida, en la obtención y el uso de BCS de origen agrícola se han documentado riesgos como la erosión del suelo y pérdida de carbono por la remoción de la biomasa (WBGU, 2009). Por su parte, la combustión de BCS de origen agrícola y agroindustrial tienen el potencial de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir el potencial de agotamiento de la capa de ozono, reducir la demanda acumulada de energía y la demanda de energía de origen no renovable (Navarro et al., 2021), en comparación con los combustibles fósiles. En cuanto a los impactos desfavorables en el ciclo de vida, los BCS de origen agrícola y agroindustrial presentan mayores emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno, tienen el potencial de presentar niveles más altos de toxicidad humana, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización.

Hacia un uso sustentable de los biocombustibles sólidos

Para mejorar la sustentabilidad de la obtención y aplicación de los BCS se identifican al menos cuatro acciones fundamentales:

Uso de los residuos: el uso de los residuos permite evitar emplear tierras y recursos hídricos que podrían destinarse para la producción de alimentos o para la conservación de ecosistemas. También ayudaría a prevenir el

cambio en el uso de suelo, tanto directo como indirecto, para el establecimiento de nuevas plantaciones energéticas, lo que permitiría evitar emisiones de carbono, así como afectaciones a la biodiversidad. El uso de residuos de las actividades de pequeña industria o de artesanías para la fabricación y aplicación de BCS, puede resultar también en alternativas que permitan satisfacer necesidades energéticas en comunidades rurales, a la vez de brindar beneficios socioeconómicos como ahorros monetarios, generación de cadenas de valor y nuevas fuentes de ingreso. De igual forma, las agroindustrias pueden hacer uso de biomásas que de otra forma tendrían que disponerse de alguna manera, lo que además de generar costos, implica emisiones de gases de efecto invernadero debido a la descomposición de la biomasa. Este uso como BCS a su vez puede resultar en beneficios económicos al sustituir o disminuir la compra de combustibles fósiles para la generación de calor.

Usos eficientes: Las tecnologías que hacen un uso más eficiente de los BCS permiten una menor demanda de ellos para la misma tarea energética, esto a su vez evita hacer un uso más intensivo de los recursos forestales o bien aprovechar mayor cantidad de energía de las biomásas de origen agrícola o agroindustrial. Por ejemplo, las estufas ecológicas de leña, si son empleadas en lugar de los fogones, requieren de menor leña para satisfacer la necesidad de cocción de alimentos, lo que se traduce en una disminución en la demanda de leña y por tanto en la intensidad de uso de este recurso. Esto a su vez permite menores costos en los casos donde se compra la leña, o en menor tiempo para su recolección. En aplicaciones industriales se pueden

aprovechar mejor la biomasa cuando se aplica en cogeneración, en lugar de sólo para la generación eléctrica.

Manejo sustentable de bosques: Es muy importante que cuando se emplea biomasa que proviene directamente de los bosques, se haga uso únicamente del incremento medio anual de la biomasa en el bosque, es decir, solo hacer uso de la biomasa que crece año con año. Esta acción tiene como objetivo evitar mermar los almacenes de carbono del bosque, ya que esperaríamos que la misma cantidad de biomasa retirada sea regenerada por el bosque al año siguiente. Una analogía sería hacer uso sólo de los intereses (el crecimiento medio anual de biomasa) sin tomar el capital (los almacenes de carbono). Dado el volumen de uso, en países en desarrollo como México esto resulta importante cuando se emplea madera de los bosques como leña y para la producción de carbón vegetal. Es también necesario que se use únicamente la fracción de biomasa que no tiene otros usos más rentables. En general, para cualquier sistema de BCS de origen forestal, la certificación del manejo sustentable de los bosques es fundamental.

Tecnologías y acciones para remover emisiones: el aprovechamiento a nivel residencial e industrial de los BCS implica emisiones de material particulado, CO, NOx, entre otros gases, de manera que las acciones para control de las emisiones son fundamentales. A nivel residencial el uso de tecnologías como estufas ecológicas con chimenea, permiten desalojar de las cocinas las emisiones contaminantes producto de la combustión. A nivel industrial se pueden emplear los precipitadores electrostáticos y los filtros

de mangas para disminuir emisiones de material particulado; a su vez la reducción de la temperatura de combustión y la disminución de la presión parcial del oxígeno en la zona de la combustión puede contribuir a aminorar las emisiones de NOx.

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 oportunidades 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, e incluso con costos negativos de mitigación de gases de efecto invernadero. 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, así como un potencial alto de eutrofización. 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 (como estufas ecológicas y cogeneración); 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
- Álvarez-Godoy, E., Díaz-Aguirre, S., & Alessandrini-Díaz, M. (2001). Utilización racional de los residuos forestales. *Revista Internacional de Silvicultura e Industria Forestales*. <http://www.fao.org/3/y1237s/y1237s00.htm#TopOfPage>
- Anaya-Reza O, Eguía-Lis JAZ, Aburto J, Amezcua-Allieri MA. (2021). Environmental impact assessment of heat generation from residues: a forest-based industry case study. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10356-3>
- 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>
- Berrueta, V.M., Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C. *et al.* (2017). Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico's Patsari improved cookstove project. *Climatic Change* 140, 63–77.
- Carneiro de Miranda, R.; Bailis, R., de Oliveira Vilela, A. Cogenerating electricity from charcoal: A promising new advanced technology. (2013). *Energy for sustainable development*. Vol 17, 171-176.
- Chidumayo, E.N.; Gumbo, D.J. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. (2013). *Energy for sustainable development*. Vol 17: p 86-94.

- ESMAP 2020 The State of Access to Modern Energy Cooking Services, The State of Access to Modern Energy Cooking Services. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/937141600195758792/pdf/The-State-of-Access-to-Modern-Energy-Cooking-Services.pdf>
- García, C.A.; Riegelhaupt, E.; Ghilardi, A.; Skutsch, M.; Islas, J.; Manzini, F.; Masera, O. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 43, 545-552.
- García-Frapolli E, Schilmann A, Berrueta V M, Riojas-Rodríguez H, Edwards R D, Johnson M and Masera O. (2010). Beyond fuelwood savings: valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico *Ecol. Econ.* 69 2598–605
- Gill-Wiehl, A., Kammen, D.M. (2022). A pro-health cookstove strategy to advance energy, social and ecological justice. *Nat Energy* 7, 999–1002.
- IEA et al. (2020). Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2020, Tracking SDG 7. <https://irena.org/publications/2020/May/Tracking-SDG7-The-Energy-Progress-Report-2020>
- 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>
- ISO. ISO Norm 14040:2006 and 140444:2006. Life cycle assessment: principles and framework. Environmental Management; 2006.
- Johnson, T.; Alatorre, C.; Romo, Z.; Liu, F. (2009). México: Estudios sobre la disminución de emisiones de carbono. Mayol ediciones/Banco Mundial.

- Killi, D.; Anlauf, R.; Kavdir, Y.; Haworth, M. (2014), Assessing the Impact of Agro-Industrial Olive Wastes in Soil Water Retention: Implications for Remediation of Degraded Soils and Water Availability for Plant Growth. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 94, 48–56.
- 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>
- Masera, O., Rivero, J.C.S. Promoting a Sustainable Energy Transition in Mexico: the Role of Solid Biofuels. *Bioenerg.* (2022). *Res.* 15, 1691–1693 <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10540-z>
- Morales-Máximo, M.; Ruíz-García, V.M.; López-Sosa, L.B.; Rutiaga-Quiñones, J.G. (2020). Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pich á Taro, Michoac á n, Mexico. *Appl. Sci.* 10, 2933.
- Morales-Máximo, Mario, Luis Bernardo López-Sosa, José Juan Alvarado-Flores, Jorge Víctor Alcaraz-Vera, Carlos A. García, Margarito Álvarez-Jara, and José Guadalupe Rutiaga-Quiñones. 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" *Fire* 6, no. 8: 317. <https://doi.org/10.3390/fire6080317>
- Musule R, Bonales-Revuelta J, Mwampamba TH, Gallardo-Alvarez RM, Masera O, García CA (2021a) Life cycle assessment of forest-derived solid biofuels: a systematic review of the literature. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10346-5>
- Musule R, Núñez J, Bonales-Revuelta J, García-Bustamante CA, Vázquez-Tinoco JC, Masera-Cerutti OR et al (2021b) Cradle to grave life cycle

- assessment of Mexican forest pellets for residential heating. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10337-6>
- Navarro-Pineda FS, Equihua-Sánchez M, Grande-Acosta GK, Sacramento Rivero JC, Islas-Samperio JM, Bonales Revuelta J et al (2021) Assessment of the environmental and economic performance of heat generation from orange peels and sugarcane straw. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10326-9>
- Ordoñez-Frías, E.J.; Azamar-Barríos, J.A.; Mata-Zayas, E.; Silván-Hernández, O.; Pampillón-González, L. (2020). Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico, *Biomass and Bioenergy*, Volume 142, 105668.
- REN21 (2022) Renewables 2022: global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- Röder, M.; Whittaker, C.; Thornley, P. How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues. (2015). *Biomass and Bioenergy*. Volume 79, p 50-63.
- Sacramento Rivero, J.C., Mwampamba, T.H., Navarro-Pineda, F.S. *et al.* A Methodological Framework for Assessing the Sustainability of Solid Biofuels Systems. (2022). *Bioenerg. Res.* **15**, 1797–1819. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10365-2>
- 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>
- Serrano-Medrano, M. *et al.* (2018). *Environ. Res. Lett.* 13 115004
- Tauro, R., García, C.A.; Skutsch, M., Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy

potential, logistic costs and market demand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 1, 380-389.

Tauro, R., Manrique, S., Franch-Pardo, I. *et al.* (2023). Spatial expansion of avocado in Mexico: Could the energy use of pruning residues offset orchard GHG emissions?. *Environ Dev Sustain.*
<https://doi.org/10.1007/s10668-023-03762-4>

Use” which will be published by Earthscan Publications Ltd. London in 2009. Cowie, A.; Berndes, G.; Bentsen, N.S.; et al. (2021). Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *GCB Bioenergy* Published. Volume13, Issue 8.

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.

World Bioenergy Association (WBA). *Global Bioenergy Statistics 2019*. Available online:
https://worldbioenergy.org/uploads/191129WBAGBS2019_HQ.pdf

Capítulo 13: Producción y tecnología rural apropiada para uso final de los biocombustibles sólidos en comunidades rurales

Mario Morales Máximo¹, Martín Parra Alcaraz²

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

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 y las tecnologías apropiadas para su uso final en comunidades rurales son aspectos importantes para el desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida en estas áreas; los biocombustibles sólidos como los pellets o briquetas derivados de la biomasa lignocelulósica, son fuentes de energía renovable que pueden reemplazar parcialmente los combustibles fósiles y reducir la dependencia de las comunidades rurales de recursos no renovables. Es así que la tecnología apropiada comunitaria es un enfoque que busca proporcionar

soluciones tecnológicas adecuadas y adaptadas a las necesidades específicas de las comunidades locales; en contraste con la adopción indiscriminada de tecnologías avanzadas o importadas que podrían no ser relevantes o sostenibles en contextos locales, se esfuerza por encontrar soluciones prácticas y asequibles que aborden los desafíos específicos que enfrenta una comunidad, este enfoque se basa en el reconocimiento de que las comunidades tienen conocimientos tradicionales y necesidades únicas que deben ser tomados en cuenta al desarrollar soluciones tecnológicas, además de centrarse en empoderar a las comunidades para que participen en el proceso de diseño, implementación y mantenimiento de las tecnologías que afectarán sus vidas, esto asegura una mayor aceptación y sostenibilidad a largo plazo, además se enfoca en promover soluciones tecnológicas diseñadas con y para las comunidades locales, respetando su conocimiento y valores mientras abordan sus necesidades específicas, empodera a las comunidades para resolver sus propios problemas mediante la adaptación y creación de soluciones tecnológicas que sean pertinentes y sostenibles en su contexto. Por ello la producción de biocombustibles sólidos y la implementación de tecnologías apropiadas en comunidades rurales pueden contribuir significativamente a la mejora de la sostenibilidad, la resiliencia y la calidad de vida de las personas que viven en estas áreas. Sin embargo, es importante realizar un análisis integral de cada contexto local para garantizar que las soluciones sean efectivas y beneficiosas en el largo plazo.

Introducción

La producción de biocombustibles sólidos (BCS) es una área en constante desarrollo, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental, es importante destacar que la selección de la tecnología dependerá de diversos factores, como la disponibilidad de materias primas, la escala de producción, los objetivos de uso y los aspectos económicos y ambientales, cada tecnología tiene sus propias ventajas y desafíos, y la investigación continúa para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción de biocombustibles sólidos (Chen et al., 2009). En la actualidad se pueden usar diferentes métodos en la producción de BCS pueden ser industriales y manuales, los cuales dependen de la naturaleza de la biomasa y el uso del biocombustible deseado, los más comunes son el corte o triturado de leña que en trozos de acuerdo el tamaño requerido, con herramientas de corte manual o motorizadas (Quintero González & Quintero González, 2015). Uno de los primeros mecanismos es el astillado que consiste en la reducción del material mediante la utilización de cuchillas o mecanismos de bordes afilados con fuerza motorizada, la compactación de este material para obtener pellets y briquetas, con temperatura para activar su adhesivo natural y sin temperatura, pero usando aglutinantes (adhesivos naturales o sintéticos). Otros son los residuos a granel, los cuales se derivan de procesar frutos como cáscaras de nuez, almendras, etcétera, otro más es el aserrín, que no se procesan y se usan para la generación de calor y electricidad en equipos que usan estos biocombustibles, y por último, tenemos el carbón vegetal

que se puede fabricar de manera artesanal e industrial, por medio de una combustión incompleta, lo que genera un alto contenido de carbono, obteniendo un mayor poder calorífico que todos biocombustibles anteriores (Reyes et al., 2016).

Los BCS derivados de materiales lignocelulósicos, como la biomasa forestal, agrícola y de residuos orgánicos, como se mencionó con anterioridad, se someten a procesos de conversión para producir combustibles sólidos que pueden utilizarse como alternativas renovables a los combustibles fósiles tradicionales, como el carbón y otros combustibles sólidos derivados del petróleo, estos biocombustibles sólidos tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de los recursos no renovables (Morales-Máximo et al., 2018). La fabricación de los BCS implica la transformación de materiales orgánicos, como biomasa de residuos agrícolas, forestales, maderables entre otros; la conversión de esta biomasa, en un biocombustible sólido compacto y adecuado para su uso como combustible en procesos de generación de energía térmica, ocupa de un determinado proceso para su producción, lo cual se sugiere los siguientes pasos:

Triturar o desmenuzador: Se utiliza para reducir el tamaño de la biomasa a partículas más pequeñas y manejables antes de la etapa de compactación.

Secado: La biomasa suele tener un alto contenido de humedad, lo que dificulta su procesamiento y almacenamiento. Una secadora reduce la humedad de la biomasa, lo que mejora su eficiencia en la producción de

biocombustibles sólidos, esto se puede llevar a cabo a través de dispositivos sofisticados para su secado o puede ser de forma natural a la intemperie o utilizando dispositivos solares (concentradores parabólicos compuestos), lo cual aportan a la sustentabilidad y ahorro económico en el secado de la materia.

Molino de martillos: Este equipo tritura aún más la biomasa seca para obtener partículas más finas, lo que facilita el proceso de compactación.

Tamiz o cribadora: Se utiliza para separar los pellets o briquetas de diferentes tamaños, asegurando una calidad y tamaño uniformes.

Prensado de pellets o briquetas Industrial: Estas prensas comprimen las partículas de biomasa triturada en pellets o briquetas sólidas, se aplican altas presiones y, a veces, calor para que las partículas se adhieran entre sí sin la necesidad de aditivos.

Prensado de pellets o Briquetas no industrial: Se refiere a la fabricación de la biomasa lignocelulósica de forma casera con la utilización de aglomerantes de origen natural para su compactación, puede ser una actividad a pequeña escala a nivel doméstico o comunitario para aprovechar los residuos biodegradables y convertirlos en una fuente de energía sostenible.

Los dispositivos que generan biocombustibles sólidos desempeñan un papel importante en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y

renovables, estas tecnologías contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promueven el uso responsable de recursos naturales al aprovechar la biomasa disponible de manera eficiente,

es importante destacar que la selección de equipos específicos dependerá del tipo de biocombustible sólido que se está produciendo, la escala de producción y otros factores, además, es fundamental cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad relevantes durante todo el proceso de fabricación.

Contexto industrial: tecnología industrializada para la fabricación de biocombustibles sólidos

Los pellets provienen de partículas de aserrín de madera, desechos agrícolas como pajas, cascarillas etc. Se procesan mediante peletizadoras que consiste en una matriz plana o cilíndrica con orificios de acuerdo al diámetro deseado y un rodillo que generan con motores eléctricos o de combustión interna (Figura 1), se genera presión y temperatura para que el biopolímero llamado lignina llegue al punto vítreo y fundido, para que extruya de paredes medias capilares y funcione como aglutinante natural, ya que es adhesivo natural de la madera, en ocasiones se agregan aglutinantes naturales para facilitar la adhesión de las partículas y obtener pellets de diámetros normalmente de 3 a 25 mm y longitud de 6 a 25 mm, estas dimensiones dependen de uso a que estén destinadas (Ojomo et al., 2010).

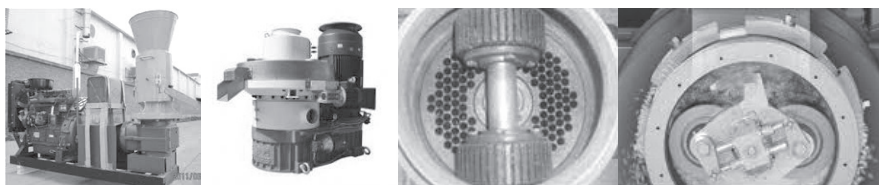


Figura 1. Peletizadoras con fuerza motriz de combustión interna y eléctrica, así como matriz plana y cilíndrica

Las briquetas provienen de partículas de aserrín de madera, desechos agrícolas como pajas, cascarillas etc, se procesan con equipos hidráulicos o mecánicos que nos generen presión (500 a 1000 kg/cm^2) y temperaturas (130 a 180°C) y llegue a las condiciones que la fabricación de pellets es decir condiciones termoplásticas de la lignina (Figura 2). Para activar su adhesivo natural de la biomasa, usando ocasionalmente aglutinantes para facilitar la adhesión de las partículas y se puedan usar procesos manuales a temperatura ambiente y se utilizan presiones más bajas menores a 500 Kg/cm^2 . Obteniendo briquetas de acuerdo a forma y tamaño deseado según su uso, normalmente las cilíndricas con diámetro de 50 a 130 mm (Orisaleye et al., 2020).



Figura 2 Equipo industrial y manual de briquetas

Residuos a granel, que son subproductos que provienen de procesar agro-productos como huesos de aceitunas, hueso de melocotón, cascaras de

frutos secos como almendra, nueces, piñones etc. Para este tipo de residuos como combustible es indispensable conocer las características fisicoquímicas, otros de uso similar a estos son el aserrín, corteza de madera, etc. Los diferentes biocombustibles sólidos presentados anteriormente, no se procesan si no que usan tal como vienen en generación eléctrica y/o térmica, por lo tanto los equipos se diseñan para el aprovechamiento de estos biocombustible de residuos a granel, estos equipos pueden ser calderas para generar vapor, calentar agua, electricidad, etc., equipos de gasificación de residuos de madera para aprovechamiento en generar electricidad y calor (cogeneración), entre otros equipos para diferentes usos (Figura 3) (Chung et al., 2010).

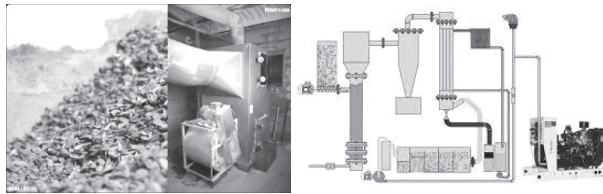


Figura 3. Calderas de biocombustible de residuos a granel y equipo de gasificación de residuos de madera para generar electricidad y calor.

Carbón vegetal, su biomasa proviene de la poda de árboles, desperdicios de procesos maderable, de productos como briquetas, entre otras. Para obtenerlo de manera artesanal (manual), se procesa en sitio de la poda de árboles o sitios cercanos, se apila la madera en forma de bóveda, dejando un hueco en centro para iniciar el fuego, entradas de aire en su base para su combustión, se colocan piedras alrededor de la bóveda y se tapa con tierra toda la bóveda, un equipo medio son bóvedas prefabricadas de tabique con el mismo diseño que la anterior, con la diferencia de una puerta de

alimentación de madera que se tiene que sellar para iniciar el proceso de carbonización y por ultimo tenemos equipos industriales para este proceso donde se pueden controlar sus condiciones obteniendo mejor calidad (Figura 4), en todos los métodos se produce una combustión incompleta (400 a 700°C) de la madera y otros residuos vegetales, obteniendo un producto que presenta un contenido elevado de carbón, por lo que su poder calorífico es superior a de la madera con valor hasta de 35 MJ/kg, además no se ve afectado por hongos e insectos xilófagos, por lo que tiene diferente usos (Antal & Grønli, 2003).



Figura 4. Tecnología artesanales e industriales en la fabricación de carbón vegetal

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

El uso de la leña como biocombustible en comunidades rurales es una práctica que ha existido durante siglos en todo el mundo. La leña se utiliza tradicionalmente para cocinar, calentar hogares y realizar actividades industriales en áreas donde el acceso a otros tipos de combustibles, como el gas natural o la electricidad, puede ser limitado o costoso, aunque la leña es una fuente de energía renovable y abundante, su uso plantea desafíos ambientales, sociales y de salud que deben abordarse de manera adecuada,

el procesamiento de esta se puede realizar de manera rudimentaria en comunidades rurales a través de la poda de árboles, ramas caídas, desperdicios de los procesos madereros, con herramientas manuales como machetes, hachas o tijeras podadoras etc. o de manera industrial con motosierras, sierras eléctricas, trituradoras etc. Hasta obtener el tamaño requerido de acuerdo a su uso (Francisco Arriaga et al., 2011).

Ventajas del uso de leña como biocombustible en comunidades rurales

Disponibilidad local: La leña es una fuente de energía que suele estar disponible en las áreas rurales de manera local y en abundancia. Esto puede reducir la dependencia de fuentes de energía importadas y costosas.

Bajo costo inicial: En muchas comunidades rurales, la leña es una opción económica para calentar hogares y cocinar alimentos, ya que el costo de adquisición suele ser bajo o incluso gratuito si se obtiene de forma sostenible.

Generación de empleo: La recolección, el procesamiento y la distribución de la leña pueden generar empleo en las comunidades rurales, lo que contribuye a la economía local.

Desafíos y problemas asociados

Deforestación y degradación del suelo: La recolección excesiva de leña puede conducir a la deforestación y a la degradación del suelo, lo que tiene

impactos negativos en el medio ambiente y en la disponibilidad futura de esta fuente de energía.

Contaminación del aire: La quema de leña en estufas o fogones ineficientes puede generar emisiones de partículas y gases contaminantes que afectan la calidad del aire y la salud de las personas que viven en esas comunidades.

Impacto en la salud: La exposición constante al humo y las emisiones de la quema de leña puede provocar problemas respiratorios y de salud en las personas, especialmente en mujeres y niños que suelen pasar más tiempo cerca de las fuentes de humo.

Ineficiencia energética: Los métodos tradicionales de quema de leña suelen ser ineficientes en términos de la cantidad de energía generada en relación con la cantidad de leña utilizada.

Soluciones y alternativas:

Estufas mejoradas: Se están desarrollando estufas y fogones mejorados que reducen las emisiones contaminantes y aumentan la eficiencia de la combustión, lo que disminuye la cantidad de leña necesaria para cocinar o calentar.

Fuentes de energía alternativas: Se pueden explorar fuentes de energía alternativas, como biogás, energía solar y pequeñas turbinas hidroeléctricas, que pueden ser más limpias y sostenibles.

Programas de reforestación y gestión sostenible: Promover la reforestación y la gestión sostenible de los recursos forestales puede ayudar a asegurar un suministro continuo de leña sin agotar los recursos naturales.

Educación y concienciación: Es importante educar a las comunidades rurales sobre los impactos negativos del uso inadecuado de la leña y promover prácticas más sostenibles y saludables.

Si bien la leña sigue siendo una fuente importante de energía en muchas comunidades rurales, es esencial abordar los desafíos ambientales y de salud asociados mediante la implementación de tecnologías mejoradas, prácticas sostenibles y opciones de energía alternativas.

Los objetivos principales de la tecnología apropiada comunitaria

La tecnología apropiada comunitaria, desde un enfoque cultural busca proporcionar soluciones tecnológicas adecuadas y adaptadas a las necesidades y contextos específicos de las comunidades locales, en contraste con la simple adopción de tecnologías avanzadas o estándar, la tecnología apropiada comunitaria se centra en el desarrollo y la implementación de herramientas y sistemas que sean sostenibles, accesibles y culturalmente relevantes para las personas que las utilizan.

Este enfoque reconoce que las comunidades tienen conocimientos y recursos únicos que pueden ser aprovechados para abordar sus propios desafíos, por lo tanto, la tecnología apropiada comunitaria involucra a las personas locales en todo el proceso, desde la identificación de problemas

hasta el diseño, la implementación y el mantenimiento de las soluciones tecnológicas, para llevar a cabo esta aportación de la tecnología apropiada se sugiere tomar en cuenta lo siguiente:

Relevancia cultural y local: Las soluciones tecnológicas deben estar en sintonía con las prácticas culturales y las formas de vida locales, de modo que sean aceptadas y adoptadas sin problemas.

Accesibilidad: Las tecnologías apropiadas comunitarias deben de diseñarse para ser asequibles y accesibles para las personas en las comunidades, evitando barreras económicas o de infraestructura.

Sostenibilidad: Estas soluciones tecnológicas deben de buscar ser sostenibles en términos económicos, ambientales y sociales, para garantizar que continúen beneficiando a la comunidad a lo largo del tiempo.

Participación comunitaria: La colaboración y participación de la comunidad son esenciales en todo el proceso, desde la identificación de necesidades hasta la implementación y el mantenimiento.

Capacidad de adaptación: Las tecnologías apropiadas comunitarias deben ser flexibles y adaptables a medida que cambian las condiciones y necesidades locales con el tiempo.

Participación y empoderamiento: Las comunidades son las protagonistas en la toma de decisiones relacionadas con la tecnología que afecta sus vidas,

se fomenta la participación y se capacita a los miembros para que sean dueños de las soluciones implementadas.

Adaptación al contexto: Las soluciones tecnológicas deben ser diseñadas teniendo en cuenta las condiciones específicas de la comunidad, como su entorno natural, recursos disponibles, cultura y necesidades.

Sostenibilidad: Se busca crear soluciones tecnológicas que sean asequibles, mantenibles y no tengan un impacto negativo en el medio ambiente, esto asegura que las soluciones perduren a lo largo del tiempo.

Transferencia de conocimiento: El conocimiento y la experiencia local deben de ser valorados y utilizados en el proceso de diseño y desarrollo de tecnologías, ya que de esta forma se fomenta el intercambio de conocimientos entre generaciones y entre comunidades.

Uso de recursos locales: Buscar minimizar la dependencia de recursos externos, utilizando materiales y habilidades disponibles dentro de la comunidad, esto no solo reduce costos, sino que también fortalece la economía local.

Enfoque holístico: La tecnología apropiada comunitaria no debe de limitarse a la implementación de dispositivos, sino que también considera aspectos sociales, económicos y culturales, debe de buscar el bienestar general de la comunidad.

Innovación: A pesar de su enfoque en soluciones simples y accesibles, la tecnología apropiada comunitaria no descarta la innovación, siempre debe de buscar encontrar nuevas formas creativas de abordar los desafíos locales.

La utilización de briqueteadoras y pelletizadoras manuales para la producción de biocombustibles sólidos es una tecnología apropiada y comunitaria en el contexto de la bioenergía sostenible, ya que estos equipos permiten la compactación de biomasa, como residuos agrícolas, aserrín, virutas de madera y otros materiales orgánicos, en forma de briquetas o pellets que pueden ser utilizados como combustibles en estufas, calderas y otros sistemas de calefacción.

Razones por las cuales estas tecnologías pueden ser apropiadas y beneficiosas a nivel comunitario

Las briqueteadoras y pelletizadoras manuales permiten aprovechar residuos agrícolas y forestales que, de otro modo, podrían ser desechados o quemados, esto reduce la contaminación del aire y los impactos ambientales negativos asociados con la quema a cielo abierto de biomasa.

Generación de empleo local: La operación de estos equipos puede ser realizada a nivel comunitario, lo que impulsa la generación de empleo local y fortalece la economía de la comunidad, la recolección, procesamiento y venta de los biocombustibles producidos pueden proporcionar oportunidades económicas para los miembros de la comunidad.

Reducción de costos energéticos: Los biocombustibles sólidos producidos a partir de briquetas y pellets suelen ser una alternativa más económica en comparación con los combustibles fósiles, ya que puede ayudar a reducir la dependencia de fuentes de energía importadas y disminuir los costos de calefacción en las comunidades.

Impacto ambiental positivo: La quema de biocombustibles sólidos producidos de manera sostenible tiende a tener un menor impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales en comparación con los combustibles fósiles.

Autosuficiencia energética: Al producir biocombustibles localmente, las comunidades pueden aumentar su autonomía energética y reducir su vulnerabilidad a las fluctuaciones de precios en los mercados de combustibles.

Reducción de residuos: La tecnología de briqueteadoras y peletizadoras ayuda a reducir la cantidad de residuos orgánicos que podrían terminar en vertederos o causar problemas de manejo de desechos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta algunos desafíos asociados con estas tecnologías:

Capacitación: Los miembros de la comunidad necesitarán capacitación adecuada para operar y mantener estos equipos de manera segura y eficiente, para lo cual se tiene que proceder en realizar un manual de uso y

mantenimiento de dispositivos manuales en este caso brqueteadoras o pelletizadoras.

Inversión inicial: Aunque las versiones manuales de estos equipos son más asequibles que las automáticas, aún puede requerirse una inversión inicial para adquirirlos, por lo cual la participación y/o financiamiento personal, institucional, gubernamental o gobierno local deberá tener un programa de financiamiento para este tipo de dispositivos.

Suministro constante de biomasa: Se debe garantizar un suministro constante y sostenible de biomasa para alimentar los equipos de manera continua, para lo cual se sugiere realizar un análisis, diagnóstico o mapeo energético de la comunidad para conocer el potencial de residuos biomásicos, presentes en la comunidad.

Aplicación de los biocombustibles

Los biocombustibles sólidos son materiales orgánicos que se utilizan como fuente de energía en dispositivos de uso final, como estufas, calderas, hornos y otros sistemas de calefacción y generación de calor. Estos biocombustibles son generalmente de origen renovable y se producen a partir de biomasa, que puede incluir una variedad de materiales orgánicos, como madera, residuos agrícolas, pellets de biomasa, cáscaras de nueces, huesos de aceituna y otros subproductos agrícolas o forestales.

La utilización de biocombustibles sólidos en dispositivos de uso final presenta varias ventajas y desafíos:

Ventajas:

- Son fuentes de energía renovable y contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles.
- Pueden ser una opción más accesible en áreas rurales o remotas donde la infraestructura de energía convencional es limitada.
- Fomentan la gestión sostenible de los recursos naturales al utilizar residuos agrícolas y forestales.

Desafíos:

- La combustión de biocombustibles sólidos puede generar emisiones contaminantes, como partículas finas y compuestos orgánicos volátiles.
- La eficiencia de la combustión varía según el tipo de biocombustible y el dispositivo utilizado. Algunos sistemas pueden tener rendimientos bajos y emisiones significativas si no se operan correctamente.
- La disponibilidad constante y la calidad de los biocombustibles pueden ser desafiantes.
- En algunos casos, la producción y el transporte de biocombustibles sólidos pueden tener impactos ambientales y económicos.

En general, la utilización efectiva y sostenible de biocombustibles sólidos en dispositivos de uso final requiere tecnologías adecuadas, buenas prácticas de combustión y consideraciones ambientales para minimizar impactos negativos y maximizar los beneficios.

La utilización de pellets y briquetas en entornos locales o rurales pueden ser utilizados como combustibles sólidos para calefacción y energía en reemplazo de fuentes de energía más tradicionales como la leña o el carbón. Aquí hay algunas consideraciones sobre su utilización:

Ventajas:

- **Eficiencia Energética:** Los pellets y las briquetas tienen un alto contenido energético y una densidad que facilita su manejo y almacenamiento, lo cual significa que pueden generar una cantidad significativa de calor en comparación con su tamaño, lo que los hace eficientes para calefacción y otras aplicaciones.
- **Bajo Impacto Ambiental:** El utilizar pellets y briquetas hechos de biomasa como fuente de energía puede ser más sostenible que utilizar combustibles fósiles, la quema de manera más limpia y emiten menos gases de efecto invernadero y contaminantes locales.
- **Gestión de Residuos:** Estos productos a menudo se fabrican a partir de residuos agrícolas o forestales, lo que puede ayudar a reducir la acumulación de residuos y promover la gestión sostenible de recursos naturales.
- **Independencia Energética:** En áreas rurales, donde el acceso a redes eléctricas o fuentes de gas puede ser limitado, el uso de pellets y briquetas puede proporcionar una fuente local y confiable de energía.
- **Mayor Control:** Los sistemas de calefacción que utilizan pellets suelen ser automatizados, lo que permite un control más preciso de la temperatura y reduce la necesidad de intervención constante.

Consideraciones:

- **Costos Iniciales:** La inversión inicial en equipos para la combustión de pellets, como estufas o calderas, puede ser relativamente alta, sin embargo, con el tiempo, los ahorros en combustible pueden compensar estos costos.
- **Suministro de Biomasa:** En áreas rurales, es fundamental asegurarse de que haya un suministro constante de pellets o briquetas disponibles, esto puede requerir la cooperación de productores locales o la implementación de sistemas de producción a pequeña escala.
- **Almacenamiento:** Los pellets y las briquetas deben almacenarse en un lugar seco para evitar que absorban humedad y pierdan eficiencia energética.
- **Mantenimiento:** Aunque los sistemas automatizados requieren menos atención que las estufas de leña tradicionales, aún es necesario realizar un mantenimiento periódico para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro.
- **Capacitación y Educación:** Es importante que los usuarios comprendan cómo operar y mantener correctamente los sistemas de calefacción basados en pellets o briquetas para garantizar un uso seguro y eficiente.

La utilización de pellets y briquetas en entornos locales o rurales puede ofrecer una alternativa sostenible y eficiente para la calefacción y la generación de energía. Sin embargo, se deben tener en cuenta las

consideraciones mencionadas anteriormente para aprovechar al máximo sus beneficios y mitigar posibles desafíos, una de las formas de aplicación y utilización de los BCS se puede dar en los siguientes dispositivos:

Sistemas de calefacción y generación eléctrica a partir de biomasa: Los biocombustibles sólidos, como los pellets y briquetas, pueden ser utilizados en sistemas de calefacción y generación eléctrica, las calderas y los sistemas de cogeneración que funcionan con biomasa pueden proporcionar calor y electricidad para hogares en comunidades rurales.

Generación de energía descentralizada con biocombustibles: En algunas comunidades rurales, la generación de energía eléctrica a pequeña escala a partir de biocombustibles puede ser una solución viable, los sistemas de generación distribuida, como microturbinas de biogás o generadores de biomasa, pueden abastecer de electricidad a comunidades pequeñas y dispersas.

Estufas y cocinas de biocombustibles: Estas estufas y cocinas están diseñadas para quemar biocombustibles de manera eficiente y limpia, reduciendo la exposición a humos tóxicos y mejorando la eficiencia energética, y por ende el apoyo a la cocción de alimentos o calentamiento de fluidos para uso de los usuarios que requieran de satisfacer de una tarea doméstica.

Calefacción con pellets de biomasa: En regiones frías, los pellets de biomasa hechos de residuos de madera, paja u otros materiales orgánicos

pueden utilizarse para calefacción residencial. Los pellets son una forma concentrada de energía renovable y pueden quemarse en estufas de pellets diseñadas específicamente.

Conclusión

En comunidades rurales, el acceso a fuentes de energía confiables y sostenibles es esencial para mejorar la calidad de vida y promover el desarrollo, los biocombustibles, que son combustibles derivados de materia orgánica renovable, pueden desempeñar un papel importante en proporcionar energía local y asequible. El uso de biocombustibles puede ser una opción valiosa para satisfacer las necesidades energéticas locales de manera sostenible, a través de tecnologías locales que pueden ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles, generar empleo local y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante señalar que la elección de utilizar biocombustibles sólidos debe tener en cuenta consideraciones ambientales y de sostenibilidad, como la disponibilidad de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto en el uso de la tierra. Además, la tecnología utilizada para la combustión y el tratamiento de los biocombustibles sólidos también influye en su eficiencia y su impacto ambiental. La elección de la tecnología dependerá de los recursos disponibles en la comunidad, las fuentes de biomasa local y las necesidades energéticas específicas; es esencial realizar un análisis exhaustivo de viabilidad técnica, económica y social antes de implementar cualquier tecnología de biocombustibles en una comunidad rural. Las briqueteadoras y peletizadoras manuales pueden ser tecnologías

apropiadas y beneficiosas para la producción comunitaria de biocombustibles sólidos, su implementación puede contribuir a la sostenibilidad ambiental, la generación de empleo local y la reducción de costos energéticos en las comunidades. Además de implementar tecnologías, es importante brindar capacitación y educación a la comunidad sobre la producción, uso seguro y mantenimiento de las tecnologías de biocombustibles, esto garantiza la sostenibilidad a largo plazo y el aprovechamiento efectivo de estas soluciones energéticas. Asimismo se debe de integrar políticas y/o proyectos comunitarios en donde los gobiernos pueden implementar programas de incentivos, subsidios y políticas de apoyo que faciliten la inversión y reduzcan las barreras económicas. Es importante considerar la disponibilidad de recursos locales, la viabilidad técnica y económica, así como el impacto ambiental al implementar tecnologías de biocombustibles en comunidades rurales, cada comunidad tendrá necesidades y condiciones únicas que deben ser tomadas en cuenta para determinar la tecnología más adecuada.

Referencias

- Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619–1640. <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- 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>
- Chung, S. S., Lau, K. Y. W., & Zhang, C. (2010). Measuring bulky waste

arisings in Hong Kong. *Waste Management*, 30(5), 737–743.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.009>

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-Quiñones, 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>

Ojomo, A. O., Agbetoye, L. A. S., & Ologunagba, F. O. (2010). Performance evaluation of a fish feed pelletizing machine. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(9), 88–97.

Orisaleye, J. I., Ojolo, S. J., & Ajiboye, 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>

Quintero González, J. R., & Quintero González, L. E. (2015). Bioamasa: métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Facultad de Ciencias e Ingeniería*, 1, 1–18.

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-Quiñones (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.

E-mail: lic.ambientalista@gmail.com

² Doctor en Ciencias de Materiales Avanzados, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.

E-mail: doctor.ambientalista@gmail.com

³ Doctor en Ciencias. Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, UMSNH.

E-mail: 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. Estos principios se han traducido en instrumentos de política ambiental en diversos países, México no es la excepción e 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. En la literatura se discuten los alcances de estos instrumentos, pero son pocos los estudios que analizan la eficacia percibida de ellos directamente por las comunidades bajo un esquema de gobernanza energética que alude a la coordinación y colaboración entre diversos actores sociales para tomar decisiones tempranas que favorezcan a la resiliencia social en un equilibrio ecológico factible.

Este estudio busca 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, como las escuelas de campo que pueden permitir el éxito de proyectos de innovación energética a partir del manejo forestal comunitario. Los principales hallazgos hasta ahora identificados 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 limitando los servicios ambientales (Ostrom y Ostrom, 1977, 1997; Buchanan, 1965; Samuelson, 1954).

A partir de los avances de la Revolución Industrial, se generaron perspectivas que justificaban el impacto ecológico en los avances tecnológicos y las innovaciones científicas, partiendo de que las afectaciones al entorno no incidían directamente en bienes privados, sino en bienes públicos cuya complejidad no permitían diferenciar ni percibir directamente los desequilibrios propiciados, (Buchholz y Sandler, 2021), además, el control de los bienes públicos radica en el Estado, que es un actor esencial para motivar el éxito de los compromisos globales y que para lograrlo debe considerar el estudio geográfico del territorio (Blackstock, et al., 2021).

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 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 instrumento de política ambiental 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 (instrumentos 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 instrumentos políticos 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).

La hibridez sugiere una interrelación constante entre acciones, estrategias y alcances de cualquier política que, sometida a un ciclo no lineal de planeación, debe estar continuamente evaluada y retroalimentada. En este esquema, recaen los instrumentos de política ambiental que sugieren acciones sociales para no generar desequilibrios ecológicos y en ello, la gobernanza tiene un papel central porque implica un proceso de decisiones 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).

Los instrumentos de política ambiental son técnicas, herramientas o esquemas de gobernanza ambiental que motivan cierto control por parte del Estado, sea de forma coercitiva o de forma voluntaria para garantizar el equilibrio ecológico de los bienes públicos que pudieran ser motivo de aprovechamiento energético (Acciai y Capano, 2021).

Estos esquemas de gobernanza implican la interacción entre actores sean sociales, gubernamentales, académicos, públicos o privados quienes pueden actuar mediante redes para compartir saberes y generar el éxito de esos instrumentos (Martínez y Espeje, 2015).

La idea de gobernanza ambiental emerge a partir de la Convención de la Diversidad Biológica (1992) y el protocolo de Kioto (1997) en donde se pretende llevar a cabo acciones de mitigación y adaptación social ante los

efectos ambientales y en donde la participación social es elemental para lograr el éxito de dichos esquemas (Castro, et al., 2015).

Es así que, en la literatura se han identificado algunos indicadores de gobernanza, entre ellos destaca la legitimidad que motiva otros principios como la transparencia, la inclusión, la responsabilidad, la justicia, la resiliencia, etc. (Torres et al., 2021) y que pueden contextualizar el factor local para lograr mejores resultados.

Los indicadores clave en la gobernanza son la legalidad, legitimidad y legitimación (Ávalos et al., 2021; McCall y Dunn, 2012; Yamuachi, 2020; Valkeapää y Karppinen, 2013) porque el primer principio supone marcos jurídicos vigentes sean formales o informales, el segundo refiere al proceso de adaptación, reconocimiento/adhesión a los esquemas de gobernanza en donde los actores clave adoptan y adaptan estrategias para lograr ciertos objetivos y, el tercero sugiere el efecto deseado de cualquier estrategia.

Algunos autores sugieren que la gobernanza ambiental implica procesos regulatorios, mecanismos de organización y espacios de participación social con fines ambientales (Lemos y Agrawal, 2006; García, 2016). Así mismo, la buena gobernanza implica relaciones de interacción multinivel en donde el actor social propicia la legitimidad y la legitimación de las estrategias tomando en cuenta los principios de responsabilidad, rendición de cuentas, transparencia, responsabilidad y respeto a los derechos humanos.

Es así que, la gobernanza energética puede comprenderse a partir de la conexión entre la legalidad, legitimidad y legitimación entre acciones y actores, es decir, la gobernanza energética sugiere un marco legal vigente, un reconocimiento o adhesión de las acciones o normas propuestas que motiven la descarbonización y los compromisos globales y, por último, el logro de los propósitos (efecto deseado). Esta alineación solo será posible si participan los actores locales de acuerdo con los contextos propios.

En la actualidad existe una marcada preocupación por transitar a 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.

Las Escuelas de Campo (ECA's), pueden ser modelos de innovación sistémica porque son herramientas construidas de acuerdo a un aprendizaje *botton up* a través de la participación experiencias y retroalimentaciones de actividades que resuelven situaciones locales. Las ECA's fueron desarrolladas por la FAO en 1980 para motivar a los productores de arroz en África. En México, las ECA's se promovieron a partir de los noventa para garantizar la seguridad alimentaria y la participación social, un caso de éxito se dio con productores de Oaxaca en donde se observó que las ECA's

facilitan la adopción de nuevas tecnologías que favorecen sus condiciones de vida.

En la literatura se ha considerado que bajo la perspectiva de redes comunitarias y bajo el término de innovación sistémica se pueden lograr resultados favorables que benefician a la comunidad. Se ha sugerido que el término innovación ha sido considerado en la agenda política a partir de las diferencias de ingreso, crecimiento, productividad y competitividad (Maloney y Perry, 2005); en los últimos cincuenta años se sabe de experiencias sobre prácticas de política de innovación (Grillitsch et al., 2019) que reflejan por una parte, la tendencia hacia la investigación y desarrollo (I+D); la innovación basada en el conocimiento y aplicación del mismo y; la interacción de la ciencia, tecnología e innovación para satisfacer las necesidades sociales, esto último, conocido como “innovation policy” (Shot y Steinmueller, 2018), ejemplo de ellos son los MDL y en la ENAREDD+. Sin embargo, aún impera la preocupación ante factores como la desigualdad, la alteración ambiental, el desempleo, la falta de cooperación, la equidad, los derechos de propiedad, entre otros (Sleuwaegen y Boiardi, 2014; Shot y Steinmuller, 2016).

De acuerdo a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) toda política de innovación busca fomentar un cambio en el sistema, por lo que, la política de innovación puede entenderse como sistémica a partir de un enfoque de política horizontal que moviliza la tecnología, el mercado y la regulación social y vertical al conectar los

sistemas a través de la I+D, el conocimiento y la aplicación social (Weber y Rohracher, 2012).

Debe distinguirse a la política de innovación tradicional de la sistémica porque la primera está condicionada a las fallas de mercado, mientras que la segunda busca la articulación entre la direccionalidad de los cambios a partir de innovaciones efectivas; entre la experimentación de nuevas tecnologías y prácticas que fortalezcan el aprendizaje; entre la importancia de aprender sobre las necesidades de los usuarios y; entre el aprendizaje y la coordinación coherente y consistente entre la política y las necesidades que atiende (Weber y Rohracher, 2012 y Sengers et al., 2016 en Grillitsch et al., 2019).

Los modelos de innovación sistémica pueden vincularse a las ECA's a partir de la interrelación de saberes entre actores locales que tienen objetivos en común y que requieren una interrelación multinivel constante y continua que favorezca su eficacia.

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.

Para lograr el objetivo de este estudio se ha realizado un análisis exploratorio, descriptivo, correlacional y parcialmente explicativo de los elementos teórico-conceptuales de la conexión entre gobernanza energética y las acciones locales a través de herramientas de transmisión del conocimiento y la construcción de saberes colectivos que pueden ser modelos de innovación sistémica que generen espacios de incidencia y eficacia política en casos de Michoacán.

El análisis se apoyó en la búsqueda de literatura en las plataformas científicas Sciencedirect, Redalyc, Scielo, Elsevier, Refseek, Scopus, WorldWideScience, utilizando palabras de búsqueda individuales y compuestas como gobernanza energética, instrumentos de política ambiental, planificación ecológica, servicios ambientales, entre otras.

El capítulo se divide en un análisis desde el contexto global para centrarse en algunas reflexiones del contexto local a partir de los alcances de la política y la normatividad que motivan la gobernanza energética en México.

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 el Banco Interamericano de Desarrollo, el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para impulsar redes de colaboración tecnológica en sectores económicos prioritarios del Estado de México e integrar un sistema local de innovación. Dando como resultado un modelo que puede ser la base para el desarrollo de políticas de innovación en el país (Solleiro et al., 2014). Por lo que es importante reconocer el dinamismo de los agentes que interactúan y que suelen agruparse en redes para lograr acciones comerciales, de cooperación, de cabildeo, de organización, entre otras que permiten un intercambio de conocimiento y de recursos en un espacio determinado. De ahí la importancia de considerar este enfoque comunitario en la estructuración de proyectos energéticos que propicien condiciones de desarrollo regional.

Una propuesta ha sido el modelo de desarrollo regional creativo sugerido por Sleuwaegen y Boiardi (2014) que busca la interacción entre procesos creativos (sean empresariales, de innovación y de internacionalización) con factores como instituciones, inteligencia o conocimiento, inspiración o creatividad e infraestructura. Todos ellos en coherencia y relación con otros

factores externos que propician el bienestar y el crecimiento sostenible (Bellandi, 2007; Camagni, 2005).

Estos procesos han favorecido la consideración de otros aspectos relacionados con la eficiencia, que se apoyan en la convicción de que el desarrollo de una comunidad territorial depende del conjunto de recursos (económicos, humanos, institucionales, naturales y culturales) que constituyen su potencial de desarrollo y de su capacidad de liderarlo. El desarrollo es el esfuerzo de un territorio, mediante la innovación, por hacerse un sitio en la división internacional del trabajo. Por lo que el enfoque sistémico de la innovación debe partir de la consideración de elementos ambientales, culturales, organizativos, económicos y de urbanización.

Desde un enfoque sistémico, la innovación ya no es sólo un proceso de “destrucción creadora” impulsado por empresas individuales que buscan ganancias extraordinarias, por el contrario, supone interrelaciones entre actores y factores, tanto internos como externos, dentro de un entorno institucional y cultural. Puede apoyarse de diversos modelos sean lineales como el Modelo de empuje de la ciencia y el modelo del tirón de la necesidad; o interactivos como el Modelo de acoplamiento, el de enlace, el sistémico, el de triple hélice, el de innovación abierta, entre otros (Gust-Bardon, 2012).

Aunque es importante considerar que en lo que respecta al estudio del proceso de innovación como un conjunto de tareas, no existe un modelo

explicativo claro y definitivo sobre el camino que tiene lugar desde que surge una invención hasta que ésta alcanza el mercado. Todos los modelos señalados en la literatura presentan carencias e interrogantes, hasta el punto de que algunos autores concluyen que hasta la fecha no se ha desarrollado un modelo de proceso de innovación generalizable (Forrest, 1991; Cooper, 1983).

La opinión generalizada es que, para mejorar la posición competitiva en una economía global, las regiones tienen que adaptar sus estructuras económicas e institucionales, así como su política a las circunstancias cambiantes (Balmaseda y Clemente, 2007).

Lundvall (1992) argumenta que, en la actualidad, el capitalismo ha llegado a la etapa en la que el conocimiento es un recurso estratégico y el aprendizaje es el proceso más importante. Esto significa la necesidad de desarrollar un entorno regional que sería beneficioso para la producción de conocimiento, la difusión y la absorción. Por lo que, la dimensión territorial cobra suma importancia debido a que el territorio se constituye por una parte como el receptor de los efectos de la globalización y por otra como el emisor de respuestas ante esos retos, así que: “todo proceso de desarrollo requiere la utilización imaginativa, racional, equilibrada y dinámica de todas las formas de capital y bienes patrimoniales sean monetarios, humanos, naturales, culturales, sociales o territoriales” (Caravaca y González, 2009: 2).

Por lo que conviene considerar al territorio como un capital que se entrelaza con el capital natural, el productivo, el humano, el cultural y el social en consideración a sus características intangibles, relacionales, publicas, selectivas y dinámicas.

De acuerdo a la literatura, en toda política de innovación existe el riesgo de enfrentar retos en la esfera ambiental, social, política, económica e institucional por lo que se ha sugerido que el conocimiento será siempre la clave para diseñar políticas de transición (Fagerberg, 2018) y enfrentar situaciones dinámicas como el cambio climático, el riesgo ambiental, la crisis energética, entre otros. Además, es primordial fomentar la participación entre agentes internos y externos que promuevan cadenas de valor y aceleren la modernización tecnológica a través de instrumentos financieros que son la herramienta política que fomentan inversiones y despliegan redes de investigación (Kergroach, 2019).

Uno de los instrumentos de política que busca reducir las emisiones contaminantes son los MDL proveniente del Protocolo de Kyoto que pretenden que países desarrollados puedan financiar, en países en desarrollo, proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a su propio compromiso de reducción (INECC, 2016; SEMARNAT, 2019).

Se estima que el registro de proyectos en México supera el 50% a nivel mundial, es decir, cuenta con 203 proyectos registrados, de los cuales cerca

de 16 pertenecen a Michoacán (Cruz et al., 2012), lo que constituye un área de oportunidad oportuna, sobre todo en la región estudiada que tiene una actividad forestal considerable.

Los proyectos MDL pueden considerar el aprovechamiento forestal y la utilización y uso energético de residuos forestales, agrícolas y ganaderos; constituyendo una posibilidad de promover la organización forestal comunitaria en el manejo del bosque.

Se le suma a ello, la recién política ENAREDD+ (Estrategia Nacional para la reducción de emisiones por degradación y deforestación, 2017) que busca la participación comunitaria en el manejo de los bosques para reducir emisiones por degradación y deforestación, así como el incremento del stock forestal y el manejo del bosque de forma participativa.

Ambos instrumentos son herramientas políticas en las que todo proyecto energético puede sustentarse, con la finalidad de aprovechar eficientemente el recurso forestal como la resina, el aserrín y los residuos forestales, agrícolas y ganaderos (como astillas, hojarasca, biomasa, estiércol, etc.).

El manejo forestal puede ser 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). Lo que invita a reflexionar sobre la estructura de un proyecto de reducción de emisiones contaminantes a través de la incorporación de mecanismos internacionales como MDL, ENAREDD+ o las Escuelas de Campo a fin de alcanzar la eficiencia energética en el aprovechamiento forestal y el manejo residuos forestales, agrícolas y ganaderos y con ello, contribuir a la demanda de energía en comunidades rurales.

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. En los casos de Michoacán se han observado algunas acciones en este sentido que apoyan el aprovechamiento de biocombustibles sólidos a partir de residuos forestales, agrícolas y ganaderos, así como la transmisión de saberes colectivos que motivan un manejo forestal comunitario e inciden en la toma de decisiones, como es el caso de productores libres de deforestación o bien la conservación, restauración, uso y aprovechamiento de ecosistemas desde un enfoque de justicia social y climática.

Los resultados preliminares muestran que en Michoacán se tiene el registro de menos del 10% de los proyectos propuestos a nivel nacional que se asocian a los Mecanismos de Desarrollo Limpio. En la región estudiada, no existen proyectos registrados bajo este mecanismo, pese a que la región

presenta un potencial forestal compuesto por una superficie arbolada comercial de 130, 766 ha, así como una superficie bajo aprovechamiento maderable de 57, 513 ha. Por lo que se han programado acciones estratégicas en la planeación y el desarrollo forestal, la restauración forestal, la protección del bosque; en educación, cultura e investigación forestal y, gestión, evaluación y seguimiento enfatizan en acciones de manejo forestal a partir de la necesidad creciente de materia prima forestal; la promoción de la organización forestal comunitaria para el manejo de los bosques; la integración de cadenas productivas para incorporar la materia prima forestal; la realización de acciones de aprovechamiento energético a partir de biomasa, entre otros.

Además, como hallazgo parcial se sabe que en la región objeto de estudio existen asociaciones comunitarias mediante las cuales se pueden implementar y gestionar proyectos de Mecanismos mediante la cooperación inter-territorial a fin de implementar proyectos de innovación sistema en materia energética, principalmente se ha observado que son factibles estos proyectos en el aprovechamiento forestal de resina, aserrín y residuos forestales, agrícolas y ganaderos entre los que destacan las astillas, la hojarasca, la biomasa, el estiércol, entre otros.

Así mismo, de la revisión de la literatura se observa que la propuesta de innovación sistémica debe vincular de forma horizontal los elementos de tecnología, mercado y regulación social y, de forma vertical, la I+D, el

conocimiento y aplicación y, la interrelación entre C+T+I, todo ello en un esquema de organización forestal comunitaria.

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.

Estos retos no son nuevos, obedecen a compromisos sexenales que han sido coartados por nuevas políticas energéticas y que, analizados por separado, ninguno de los compromisos ha asumido la responsabilidad compartida pero diferenciada en la adaptación de acciones para enfrentar el cambio

climático y sobre todo, garantizar los derechos humanos al acceso asequible de energía.

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 (Valdez et al., 2005). 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).

Se observó en 2019 un interés fuerte por las tecnologías del hidrógeno, principalmente en el funcionamiento de la capacidad de electrólisis. El

mercado del hidrógeno impulso la expansión de vehículos de celdas de combustible en China, Japón y Corea. Sin embargo, aún son pocos los esfuerzos por motivar el uso del hidrógeno verde, porque en gran medida la demanda del hidrógeno se abastece de combustibles fósiles, debido a que el 6% del gas natural y el 2% del carbón mundial, se destinan a la producción de hidrógeno, generando emisiones cercanas a 830 millones de toneladas de dióxido de carbono al año (IEA, 202).

En 2020 se observó un descenso global del 25% en la demanda de energía por semana en países con confinamiento total derivados de la pandemia del COVID, y los países en confinamiento parcial mostraron un descenso del 18%. Además, se apreció una reducción mayor al 55% en la demanda del petróleo en 2020 (IEA, 202).

Además, se han observado algunos aspectos que han incidido en el sector energético, como la seguridad energética como prioridad en economías emergentes; la seguridad eléctrica y los sistemas energéticos resistentes son más indispensables que nunca para las sociedades modernas y, las transiciones energéticas limpias deben estar en el centro de los planes de recuperación y estímulo económico. A esto, se le suma el repunte de emisiones a partir del momento en que se reactivaron las actividades sociales y económicas detenidas por la pandemia.

Ahora bien, a pesar del impacto de la pandemia, las energías renovables aceleraron su expansión en 2020, con un aumento del 50% en su

contribución a la reducción de las emisiones del sector eléctrico respecto a 2019.

Sin embargo, desde una visión política, la perspectiva es distinta. En el actual gobierno se ha optimizado el uso de energía fósil al reactivar refinerías y al frenar la inversión en estrategias de energía alterna y renovable. Esto mismo se observa en la reforma a la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) que busca eliminar el mercado eléctrico mayorista, lo que originaria, según los expertos, un retroceso a la implementación de elementos como el H2 que ya es un hecho en economías de primer mundo. La EIL además, busca incentivar a la Comisión Federal de Electricidad, cerrando las posibilidades al sector privado que puede ser un factor clave para el mercado energético porque apuestan a la inversión, acercan tecnologías innovadoras y reactivan la economía local.

Desde el aspecto ambiental, esta reforma motivaría serios impactos ecológicos porque apoya el uso de fuentes fósiles y con ello las emisiones contaminantes constantes. Estas circunstancias vulneran diversos artículos constitucionales como la premisa que apoya el derecho al ambiente sano para el desarrollo y bienestar.

Recientemente en 2023, se publicó en Acuerdo por el que se aprueba y publica el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2020-2024, sin embargo, a la fecha diversos grupos sociales y públicos, han manifestado su preocupación por el posicionamiento del Programa que apoya a la inversión en el sector energético posibilitando la

vulneración de derechos Constitucionales, humanos, de participación libre e informada, de seguridad social y energética, entre otros que pueden limitar el objetivo de dicho programa porque además y ése a ser una política pública que apoya el aprovechamiento sustentable de la energía, no menciona ninguna estrategia de manejo, uso, producción, aprovechamiento, comercialización y otra similar del hidrogeno, tomando de referente que en el contexto global su análisis está presente en todas las agendas ambientales que apoyan la descarbonización efectiva y eficiente.

Ahora bien, desde lo local y tomando en cuenta los alcances de las ECA's en la transmisión de saberes, es posible y factible que a través de estas metodologías se puedan incorporan procesos innovadores que desde una visión hibrida generen esquemas de aprovechamiento de residuos, principalmente los agrícolas, ganaderos y forestales, sometiéndolos no solo a los MDL o a los alcances de la ENAREDD+, sino incorporando tecnológicas (I+D+I) que les permitan desde lo local, obtener una eficiencia energética de sus residuos y aprovechar esa energía en otros proceso básicos que pueden favorecer el rezago social y mejorar la calidad de vida desde lo local.

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.

Los principales retos políticos, normativos y tecnológicos observados son los siguientes:

- a) La política energética actual apoya y fortalece el uso de combustibles fósiles, ejemplo de ello es la Refinería de Dos Bocas que ha generado incertidumbre local y cuestionado los alcances del derecho humano al acceso de energía asequible y el derecho al ambiente sano para el desarrollo y bienestar.
- b) La política actual, además, no considera las fases del manejo de energías que realmente pueden favorecer la transición energética, como el uso del hidrógeno, en donde no se cuenta con las bases ni normativas, ni políticas e incluso ni tecnológicas para un manejo ambientalmente adecuado, desde su producción, almacenamiento, distribución y comercialización.
- c) Existe un rezago normativo significativo que puede limitar los compromisos globales que apoyan la descarbonización como el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 porque no se precisa con claridad los mecanismos para transitar energéticamente hablando desde una perspectiva ecológica, social, económica y tecnológica.
- d) Desde el aspecto tecnológico, son escasos los estudios que abonan

al éxito de estrategias efectivas de aplicaciones energéticas de biomasa, en la literatura se destacan las bondades ecológicas, sociales y económicas, pero al llevar a cabo estos proyectos es posible que aún exista resistencia social en su incorporación, es por esto que se sugiere que un primer acercamiento sea a través de las ECA's como modelos de interacción de saberes desde lo local.

- e) Además, en México, se observa que recientemente hay restricciones económicas a la ciencia y tecnología, lo que representa una preocupación nacional porque puede frenar cualquier posibilidad de descarbonización en México

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.
- Balmaseda, E. M. V., Elguezabal, I. Z., & Clemente, G. I. (2007). Evolución de los modelos sobre el proceso de innovación: desde el modelo lineal hasta los sistemas de innovación. In *Decisiones basadas en el conocimiento y en el papel social de la empresa: XX Congreso anual de AEDEM* (p. 28). Asociación Española de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM).
- Bellandi, M. (2007). Industrial Disctricts and Waves of Industrialization: A Rich and Contested Terrain. *Scienze regionali*.
- Birkenholtz, T., 2008. Contesting expertise: the politics of environmental knowledge in northern Indian groundwater practices. *Geoforum* 39, 466–482.
- Blackstock, K. L., Novo, P., Byg, A., Creaney, R., Bourke, A. J., Maxwell, J. L., ... & Waylen, K. A. (2021). Policy instruments for environmental public goods: Interdependencies and hybridity. *Land Use Policy*, 107, 104709.
- Buchanan, J.M., 1965. An economic theory of clubs. *Economica* 32, 1–14.
- Buchholz, W., & Sandler, T. (2021). Global public goods: a survey. *Journal of Economic Literature*, 59(2), 488-545.
- Camagni, R. (2005). The rationale for territorial cohesion: issues and possibile policy strategies.
- Caravaca Barroso, I., & González Romero, G. (2009). Las redes de colaboración como base del desarrollo territorial. *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 13 (289), 281-309.

- Castro, F. de, Hogenboom, B., y Baud, M. (2015). Gobernanza ambiental en América Latina en la encrucijada, moviéndose entre múltiples imágenes, interacciones e instituciones. En F. de Castro, B. Hogenboom y M. Baud (coords.), *Gobernanza ambiental en América Latina* (pp. 13-38). Argentina: Clacso.
- Cooper, R. G. (1983). The new product process: an empirically -based definition scheme, *R&D Management*, vol. 13, n° 1, pp. 1-13.
- Cruz Ramos, A., Flores Delgado, A., Ibarra-Yúnez, A., & Zamorano Cervantes, H. (2012). Análisis de la distribución territorial de proyectos del mecanismo para un desarrollo limpio: El caso de los estados de la república mexicana. *Economía mexicana*. Nueva época, 21(2), 213-250.
- 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>.
- Fagerberg, J. (2018). Mobilizing innovation for sustainability transitions: A comment on transformative innovation policy. *Research Policy*, 47(9), 1568-1576.
- Forrest, J. E. (1991). Models of the process of technological innovation. *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol. 3, n° 4, pp 439-453.
- García, M. A. B. (2016). Nuevos instrumentos de política ambiental en México. *Expresión Económica. Revista de análisis*, (36), 5-19.
- 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.

- Gust-Bardon, N. I. (2012). *Regional development in the context of an innovation process* (No. R5/2012). Working Papers firms and region.
- IEA. International Energy Agency. Consulta en 2021 a través de: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. El Mecanismo de Desarrollo Limpio, consultado en <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/elmdl.htm>; <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/actoresdelprocesomdl.html>, 13-07-2016
- 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>.
- Kergroach, S. (2019). National innovation policies for technology upgrading through GVCs: A cross-country comparison. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 258-272.
- 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.
- Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental governance. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 31, 297-325.
- 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>.
- Lundvall, B. A. (1992). *National Systems of Innovation. Towards a Theory of Innovation an Interactive Learning*. Pinter, London and New York.
- Maloney, W. F., & Perry, G. (2005). Hacia una política de innovación eficiente en América Latina. *Revista de la CEPAL*.

- 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>
- McCall, M. K., & Dunn, C. E. (2012). Geo-information tools for participatory spatial planning: Fulfilling the criteria for 'good' governance? *Geoforum*, 43(1), 81-94.
- 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.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General Adjunta para Proyectos de Cambio Climático, enero, 2019.
- Sleuwaegen, L., & Boiardi, P. (2014). Creativity and regional innovation: Evidence from EU regions. *Research Policy*, 43(9), 1508-1522.
- Sengers, F., Wieczorek, A.J., Raven, R., (2016). Experimenting for sustainability transitions: a systematic literature review. *Technol. Forecast. Soc. Change*.
- Schot, J., Steinmueller, W. E., (2016). Framing innovation policy for transformative change: innovation policy 3.0. Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex, Brighton.

- Solleiro, J. L., Gaona, C., & Castañón, R. (2014). Políticas para el Desarrollo de Sistemas de Innovación en México. *Journal of technology management & innovation*, 9(4), 98-109.
- Torres Alvarez, M. M., Trench, T., Márquez Rosano, C., y Bello Baltazar, E. (2021). ¿Gobernanza ambiental, desde dónde? La imbricación de la acción pública sobre los marcos culturales locales. *región y sociedad*, 33, e1429. doi: 10.22198/rys2021/33/1429ISSN e-2448-4849 región y sociedad / año 33 / 2021 / e1429<https://doi.org/10.22198/rys2021/33/1429>
- Valkeapää, A., & Karppinen, H. (2013). Citizens' view of legitimacy in the context of Finnish forest policy. *Forest Policy and Economics*, 28, 52-59.
- Von Gadow, K., Orois, S. S., & Calderón, O. A. A. (2004). Manejo forestal con bases científicas. *Madera y Bosques*, 10(2), 3-16.
- Weber, K.M., Rohracher, H., (2012). Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework. *Res. Policy* 41, 1037- 1047.
- Yamauchi Mansur Levy, M. D. (2020). *Análisis sobre experiencias de Vigilancia Forestal Independiente en Honduras, Panamá y Perú: Insumos para la buena gobernanza forestal* (Doctoral

Semblanza 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 MENCION HONORIFICA 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 solidos 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.

Semblanza de los autores



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 CONAHCYT, 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 Tecnología 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, en 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 CONAHCYT 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. Serafín 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 Nicolas 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 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 libro **“Aplicaciones Energéticas de la biomasa:
perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos”**
se terminó de imprimir en octubre de 2023 en los talleres gráficos
de ImpresionArte, ubicados en Morelia, Michoacán.

El tiraje fue de 400 ejemplares.