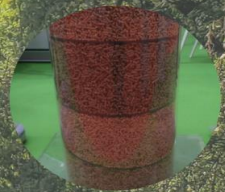




Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural

SISTEMAS DE BIOMASA Y BIOENERGÍA: CASOS EJEMPLARES EN IBEROAMÉRICA

HACIA LA SUSTENTABILIDAD BIOENERGÉTICA TERRITORIAL

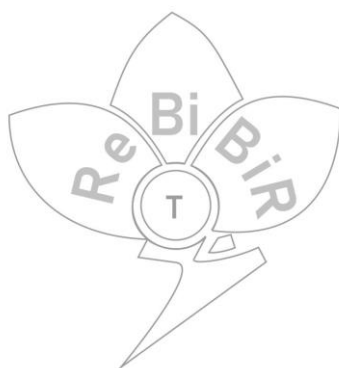


AÑO 2021

**RED IBEROAMERICANA DE TECNOLOGÍAS DE BIOMASA Y
BIOENERGÍA RURAL (REBIBIR-T)**

SISTEMAS DE BIOMASA Y BIOENERGÍA: CASOS EJEMPLARES EN IBEROAMÉRICA

HACIA LA SUSTENTABILIDAD BIOENERGÉTICA TERRITORIAL



**PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA
EL DESARROLLO (PROGRAMA CYTED)**



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



Una publicación de la Red Iberoamericana de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) constituida bajo la promoción del Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Cita Libro:

Manrique SM, Ojeda ML, Sánchez Hervás JM, Curbelo Alonso A, Garrido S. Editores. 2021. *Sistemas de Biomasa y Bioenergía: Casos Ejemplares en Iberoamérica. Hacia la sustentabilidad bioenergética territorial*. CYTED Ediciones. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). ISBN: 978-84-15413-40-0. Madrid, España. 444 Páginas.

Cita Capítulos:

Apellidos autores. 2021. Título capítulo. Estudio de caso N°. Páginas. En: *Sistemas de Biomasa y Bioenergía: Casos Ejemplares en Iberoamérica. Hacia la sustentabilidad bioenergética territorial*. Manrique SM, Ojeda ML, Sánchez Hervás JM, Curbelo Alonso A, Garrido S. Editores. CYTED Ediciones. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). ISBN: 978-84-15413-40-0. Madrid, España. 444 Páginas.

Fecha registro: 30/07/2021

Número de registro:

Editorial: Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED)

ISBN electrónico: 978-84-15413-40-0

Los textos de este libro son copyleft. Los editores y autores autorizan la copia, distribución y citado de los mismos en cualquier medio y formato, siempre y cuando sea sin fines de lucro, el autor sea reconocido como tal, se cite la presente edición como fuente original, y se informe al autor. La reproducción de los textos con fines comerciales queda expresamente prohibida sin el permiso expreso del editor. Toda obra o edición que utilice estos textos, con o sin fines de lucro, deberá conceder estos derechos expresamente mediante la inclusión de la presente cláusula copyleft.



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



SISTEMAS DE BIOMASA Y BIOENERGÍA: CASOS EJEMPLARES EN IBEROAMÉRICA

HACIA LA SUSTENTABILIDAD BIOENERGÉTICA TERRITORIAL

Editores:

**Silvina M Manrique, María Luisa Ojeda, José María Sánchez Hervás,
Alfredo Curbelo Alonso y Santiago Garrido**

Año 2021

Dedicado a nuestras comunidades



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Prólogo. Páginas 5-8
ISBN: 978-84-15413-40-0

PRÓLOGO

Silvina M Manrique^{1*}, María Luisa Ojeda², José María Sánchez Hervás³, Alfredo Curbelo Alonso⁴ y Santiago Garrido⁵

¹*Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439.*

²*Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile*

³*Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible, CIEMAT, 28040, Madrid, España.*

⁴*Grupo Bioenergía. CUBAENERGÍA. Cuba.*

⁵*IESCT-UNQ-CICBA, CONICET, Bernal, Provincia de Buenos Aires, CP1876, Argentina*

Sobre la Red ReBiBiR (T) y el trabajo previo

ReBiBiR (T) es la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural, conformada por universidades, centros de investigación, entidades de la administración pública y empresas, que sincronizan esfuerzos para la innovación científica y el desarrollo tecnológico, como base para la promoción de "sistemas bioenergéticos" integralmente más sustentables a nivel territorial. Esta Red se ha conformado bajo el auspicio del Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).

Los "sistemas bioenergéticos" (SBEs) son entendidos como las diferentes cadenas de aprovechamiento de recursos de biomasa que pueden desarrollarse en los territorios, involucrando una serie de eslabones que van desde la producción del recurso, al procesamiento, gestión y aplicación del mismo, por lo que cualquier aporte en dichos eslabones son focos de interés para ReBiBiR (T). El punto de partida para el abordaje de los SBEs, es el reconocimiento de su complejidad, diversidad y especificidad en cada contexto territorial particular en el cual se despliegan. El objetivo general que se persigue en esta Red, es promover el uso y manejo eficiente de la

biomasa sólida y su valorización energética en el ámbito rural y urbano-marginal iberoamericano, poniendo a disposición de la Región los avances tecnológicos fundamentales que podrían aportar a la construcción sinérgica de comunidades y territorios más sustentables y resilientes frente al cambio climático.

Los aportes de la Red se organizan en cuatro pilares temáticos que construyen las cadenas de valorización de biomasa:

I. Recursos: metodologías, herramientas, procedimientos vinculados con relevamiento de biomasa sólida; cuantificación de existencias; caracterización físico-química; estimación de potencial bio-energético; criterios de restricción de uso de biomasa.

II. Tecnologías: desarrollos tecnológicos o innovaciones para acondicionamiento de biomasa (secado, densificación, otros) y para aprovechamiento energético térmico (para cocción, calefacción, agua caliente, calor de proceso); procesos de conversión (combustión, gasificación, pirólisis, otros); relevamiento de tipos de productos (calderas, parrillas, pequeños reactores); esquemas de construcción; técnicas de estimación de rendimientos; procedimientos de diseño; rutinas y modelos de simulación y otros para escala doméstica y pequeñas industrias.

III. Mecanismos de participación y transferencia: identificación de técnicas y estrategias participativas exitosas para la puesta en marcha de SB rurales; esquemas de inclusión; enfoques de equidad de género; mecanismos de accesibilidad y apropiación; experiencias de adaptabilidad al usuario y contexto territorial.

IV. Políticas, marcos institucionales y esquemas de financiamiento: marcos normativos, mecanismos de promoción e inclusión; figuras cooperativas y asociativas; ordenamientos institucionales; pautas de integración vertical y horizontal.

Al momento de publicar el presente Libro, la Red está conformada por más de 150 investigadores, técnicos, gestores de la administración pública y empresas de Iberoamérica (<http://www.cytex.org/content/719rt0587-integrantes>). Nuestro primer libro publicado muestra un relevamiento diagnóstico de la situación de la Región Iberoamericana en los cuatro ejes temáticos mencionados y puede descargarse desde: <http://www.cytex.org/es/biblioteca/primer-libro-de-la-red-rebibir-t>.

En dicho Libro se identifican las debilidades y fortalezas, las capacidades y desarrollos logrados, y el contexto actual para la promoción de la biomasa y la bioenergía en la región Iberoamericana. Una vez reconocida la brecha existente en pos de una transición energética-ambiental global necesaria para asegurar la subsistencia planetaria, en este segundo Libro conjunto nos hemos propuesto enfocarnos en identificar casos ejemplares, aprendizajes y experiencias que resulten herramientas valiosas para achicar dicha brecha, como hitos de un sendero hacia un escenario de mayor sustentabilidad territorial.

Sobre el propósito de esta Publicación y su construcción

Este Libro se propuso recopilar y analizar una serie de estudios de caso de experiencias de diseño e implementación de proyectos de aprovechamiento de biomasa

y su valorización en la región Iberoamericana. Se buscó que los casos presentados abordaran la diversidad geográfica que expresa la Red y la variedad de usos y modelos de gestión posibles en los SBEs, así como la diversidad de enfoques y perspectivas de análisis y ejecución de estos sistemas, incluyendo por tanto los cuatro pilares temáticos de la Red.

Los objetivos propuestos con este Libro fueron:

- Analizar experiencias regionales en el uso y aprovechamiento de biomasa con fines energéticos;
- Extraer aprendizajes y recomendaciones de buenas prácticas que tengan que ver con el uso y manejo de recursos de biomasa; con la aplicación de diferentes tecnologías; las políticas de promoción e implementación; los esquemas de participación, transferencia, re-adecuación y aplicabilidad adoptados; y/o los mecanismos de financiamiento y promoción de la actividad;
- Extraer aprendizajes de casos que no llegaron a implementarse, o quedaron sin efecto en su ejecución o se detuvieron en algún momento en el tiempo; analizando de qué manera, con qué herramientas, políticas, instrumentos o prácticas se podrían promover, activar u optimizar en cada caso.

Dada la variedad de grupos que integran la Red, los estudios de caso se identificaron a partir de relaciones problema-solución. Por ejemplo:

1) un problema ambiental, económico, productivo o social a resolver en el que el aprovechamiento de biomasa podía ser una solución (a veces como la causa del inicio del proyecto, o de determinada demanda). En este caso, quizás el objetivo principal del proyecto no fue el uso energético, sino resolver un problema de contaminación por ejemplo, y quizás el uso energético fuese secundario. Nuestra Red incluye el estudio de "Biomasa" en sí misma, y el análisis de su utilización con otros fines, es totalmente complementario.

2) problemas con los recursos biomásicos o en relación a las tecnologías disponibles y cómo se resolvieron esos problemas. Ya sea a partir de ajustes y cambios en la tecnología o en relación a los recursos (disponibilidad, procesamiento previo, etc.)

3) problemas específicos del proceso tecnológico y las soluciones que se aplicaron o se podían aplicar (incluyendo problemas de costos, rentabilidad, eficiencia, etc.)

4) problemas de financiamiento o de regulación y cómo se resolvieron, tanto al momento de iniciar algún proyecto o en el proceso (por ejemplo, cambios en la tecnología o en la disponibilidad de recursos).

5) problemas de transferencia, vinculación o participación a partir de esa experiencia concreta (incluyendo problemas de los adoptantes de la tecnología, de los proveedores de recursos, de usuarios finales, de los instrumentos que se tenían para la transferencia, etc.).

Este Libro fue la oportunidad de hacer un ejercicio de reflexión sobre las propias prácticas y los problemas con los que los diferentes grupos se encontraron frente al diseño o implementación de los SBEs en los territorios. En todos los casos, se procuró compartir experiencias que brindaran aprendizajes ya sea por las soluciones

encontradas o las innovaciones, pero también por los problemas no resueltos, siendo la oportunidad en estos últimos casos de aportar algunas interpretaciones y propuestas para evitar la repetición de idéntico problema.

El Libro se ha organizado en cuatro secciones temáticas y una sección de comentarios finales. Estas secciones son:

- Sección I. Métodos de estimación de potencial de biomasa y bioenergía
- Sección II. Aplicaciones y métodos de evaluación de sustentabilidad de la biomasa
- Sección III. Procesos y tecnologías exitosos en el uso de la biomasa
- Sección IV. Modelos de gestión, políticas y esquemas de financiamiento

Las tres primeras secciones agrupan en total 20 Estudios de Caso relevados de toda la región, y constituyen capítulos individuales. Al final de cada Caso, se incluyen reflexiones y comentarios que buscan destacar los aportes que cada uno realiza para el Maletín de Buenas Prácticas de la Red ReBiBiR-T.

Se brinda de esta manera, un conjunto de experiencias diversas, enriquecedoras, complementarias, sistémicas y multidisciplinarias que busca apalancar otros proyectos y emprendimientos en la Región, a partir de una plataforma ya construida y cimentada en un generoso intercambio entre numerosos grupos de trabajo.

Por último, no puede dejar de mencionarse que este Libro se elaboró en medio de la pandemia mundial de COVID-19, con impactos de dimensiones todavía desconocidas, que se entrelazarán con conflictos socio-económicos y amenazas ambientales mundiales, como el cambio climático. Entendemos que el desafío más importante desde el punto de vista de la bioenergía a futuro, es lograr fortalecer los entramados territoriales con aportes estratégicos que armonicen las relaciones entre las fronteras de los mundos físico, natural y social, pero basados en principios éticos de solidaridad intra e intergeneracional. Los tiempos de crisis son siempre tiempo de oportunidades. Es un momento clave para promover que los recursos de biomasa sean estudiados, valorados, manejados de manera eficiente, e incorporados en los esquemas territoriales a partir de estrategias creativas y respetuosas, que constituyan valiosas herramientas para el desarrollo regional. He aquí el propósito del presente Libro.

Los Editores

ÍNDICE

PRÓLOGO	5
Sobre la Red ReBiBiR (T) y el trabajo previo	5
Sobre el propósito de esta Publicación y su construcción	6
I.MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE POTENCIAL DE BIOMASA Y BIOENERGÍA.....	13
Introducción a la Sección I	13
Estudios de caso incluidos en esta Sección	14
Referencias	15
CASO I. Evaluación energética de residuos procedentes de la producción de mezcal en Michoacán, México.	16
CASO II. Potencial técnico bioenergético de residuos forestales en el Campo Experimental Agroforestal Trevelin, Argentina	37
CASO III. Potencial energético de la biomasa residual pecuaria en el campus de la UNALM, Perú	57
CASO IV. Potencial teórico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables y herbáceos en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano	69
CASO V. Formulación de una herramienta de cálculo para estimar la energía y el potencial de generación a partir de biomasa	99
II. APLICACIONES Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD DE LA BIOMASA.....	115
Introducción a la Sección II.....	115
Estudios de caso incluidos en esta Sección	116
Referencias	117
CASO VI. Impactos ambientales asociados al aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos: Parte I: Tecnologías y antecedentes	118
CASO VII. Impactos ambientales asociados al aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos: Parte II: Metodología y Aplicaciones	139

CASO VIII. Implementación de *Saccharum spontaneum* L. como materia prima en el tratamiento de aguas contaminadas 169

CASO IX. Valorización energética de residuos de la industria, una medida de mitigación del cambio climático..... 198

III.PROCESOS Y TECNOLOGÍAS EXITOSOS EN EL USO DE LA BIOMASA 212

Introducción a la Sección III212

Estudios de caso incluidos en esta Sección.....213

Referencias214

CASO X. Torrefacción de biomasa residual forestal proveniente de podas en la ciudad de Bogotá y su uso en co-combustión214

CASO XI. Diversificación de la producción agro industrial del Noroeste Argentino a través de la producción de pellets de residuos de cosecha de caña de azúcar229

CASO XII. Cocinar y calefaccionar con residuos de poda. Promover la apropiación de tecnologías eficientes y de bajo costo desde el espacio comunitario247

CASO XIII. Parque Chaqueño Argentino: aplicaciones dendroenergéticas267

CASO XIV. Estudios experimentales sobre la generación de Syngas a partir de desechos de madera en la Patagonia chilena297

CASO XV. Desempeño energético de un gasificador comercial de biomasa acoplado a un sistema de generación de potencia.....310

CASO XVI. Revalorización energética de residuos del sector cervecero324

CASO XVII. Redes de calefacción alimentadas con biomasa y su aplicación en municipios rurales: Caso Cuéllar, Segovia (España).355

CASO XVIII. Sistemas de biogás a pequeña escala para las zonas rurales. Caso de estudio en Ecuador.....371

CASO XIX. Espacios rurales en transición energética. Transformando los residuos en bioenergía390

CASO XX. Estado de las Energías renovables en el Perú410

IV. MODELOS DE GESTIÓN, POLÍTICAS Y ESQUEMAS DE FINANCIAMIENTO	428
Introducción a la Sección IV	428
Reflexiones transversales a los capítulos de este Libro	429
V. APORTES PARA EL MALETÍN DE BUENAS PRÁCTICAS EN BIOMASA Y BIOENERGIA	434
5.1. Consideraciones finales	434
5.2. Mirada al futuro	436
EQUIPO EDITORIAL.....	438
Comité Académico y Científico	438
Autores (por orden alfabético)	438
Equipo de Revisión Editorial	439
Sobre los grupos participantes.....	439
AGRADECIMIENTOS	442

SECCIÓN I:

**MÉTODOS DE
ESTIMACIÓN DE
POTENCIAL DE BIOMASA Y
BIOENERGÍA**

I. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE POTENCIAL DE BIOMASA Y BIOENERGÍA

Silvina M Manrique^{1*} y María Luisa Ojeda²

¹*Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSA). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439.*

²*Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile*

Introducción a la Sección I

Se ha sugerido que la economía mundial podría ser operada con luz solar. Sin embargo, a pesar de que es importante la cantidad de energía proveniente del sol, la misma llega muy diluida (baja calidad) y es mediante los procesos naturales en la biosfera, como la fotosíntesis, que es convertida en energía química de alta calidad a costos considerables. Por ejemplo, para obtener un combustible como la madera, la luz solar debe ser capturada por las hojas, transformada muchas veces, convertida y acumulada en la planta como celulosa, lo cual ocurre con una eficiencia de aproximadamente 0,1 %, que aún duplica la lograda en el ecosistema acuático (aunque cubre aproximadamente 2/3 de la superficie de la Tierra)(Carillo, 2004).

En términos generales, el potencial mundial de la biomasa y bioenergía puede discriminarse en diferentes categorías

- El Potencial teórico: el límite teórico superior de la producción bioenergética que es limitada fundamentalmente por barreras físicas y biológicas. Este potencial teórico incluye la producción desde tierras, ríos, mares y océanos.
- El Potencial geográfico la fracción del potencial teórico de producción bioenergética que está limitado por un área de tierra.

-
- El Potencial técnico: la fracción del potencial geográfico que no está limitado por la demanda por tierra para producción alimenticia, viviendas e infraestructura, y conservación de bosques, basado en un nivel asumido de tecnología agrícola avanzada.
 - El Potencial económico: la fracción del potencial técnico que puede ser producido a niveles económicamente rentables.
 - El Potencial de implementación: la fracción del potencial económico que puede ser implementada dentro de un cierto periodo de tiempo, teniendo en cuenta restricciones institucionales, sociales e incentivos políticos.

El rendimiento de biomasa y su potencial varía de país en país, desde medios en zonas templadas a altos en los subtropicales y trópicos. Si bien hay una complejidad inherente en la estimación del potencial de recursos de biomasa y teniendo en cuenta numerosas restricciones, los expertos señalan que dicho potencial técnicamente factible podría situarse entre 100 y 300 EJ al 2050 (WBA, 2019; IEA, 2020). Para contextualizar este potencial, el suministro de biomasa para energía en el año 2017 fue de aproximadamente 55.6 EJ/año, y la demanda total de energía primaria a nivel mundial, incluidos los combustibles fósiles, de unos 585 EJ (WBA, 2019).

La biomasa, desde el punto de vista energético, constituye una fuente de energía renovable, en la cual reposan grandes expectativas a nivel mundial. La gran diversidad de recursos que se engloban bajo este concepto, su amplia distribución y accesibilidad, así como su cualidad asumida de ser una energía neutra en emisiones de carbono, la convierten en una potencial alternativa futura frente al probable cambio climático y agotamiento de los recursos fósiles.

Sin embargo, los estudios de los recursos de biomasa son específicos para cada tipo de recurso. Cuando se planifica llevar adelante un SBE, por tanto, estos recursos deben ser particularmente estudiados en el territorio, realizando una caracterización de los mismos y una evaluación de su potencial energético, a fin de ajustar oferta y demanda, y no planificar sistemas sobredimensionados que puedan ir en detrimento del medio socio-natural. Los recursos de biomasa deben ser una fuente energética a nivel local en primer lugar, y si existiera superávit, esta escala podría ser ampliada. Esto se justifica, entre otras razones, en el hecho de que los costos de logística y transporte son una parte importante en los sistemas de aprovechamiento de biomasa, pero por otra parte -y que es el interés perseguido en el presente Libro- en que debe constituirse en un instrumento válido para la implementación de esquemas sociales -no sólo energéticos- más sustentables: mayor acceso a la energía a sectores marginados, mejora de la calidad de vida, preservación del patrimonio natural, menor contaminación local y emisiones atmosféricas y de gases efecto invernadero, entre otros.

Estudios de caso incluidos en esta Sección

En esta sección se incluyen cinco estudios de caso que muestran un conjunto de métodos que pueden ser útiles para proyectos de bioenergía en etapa de diseño, o proyectos de investigación que requieren conocer qué cantidad de recurso existe,

cuáles son los puntos de generación y cuál es su distribución o cuáles son las características de los mismos y su potencialidad energética.

En el CASO I, se realiza una evaluación energética de residuos procedentes de la producción de mezcal en Michoacán, México, mostrando la aplicación de índices de generación de residuos primarios y secundarios mediante mediciones directas en campo. En el CASO II, se estima el potencial técnico bioenergético de residuos forestales (generados a campo y en aserradero) en un predio experimental en Chubut, Argentina, que combina una revisión energética de registros y estadísticas internas, junto a relevamiento de terreno, aplicación de software y criterio técnico, que permite proponer un plan de manejo silvícola y estimar la generación de residuos en el tiempo y su potencial cobertura energética. En el CASO III se estudia el potencial energético de la biomasa residual pecuaria generada dentro de un predio Universitario, donde se aplican métodos indirectos y directos, mencionados previamente, proponiendo un esquema de muestreo y procesamiento de las muestras. En el CASO IV, el análisis del potencial teórico de generación de energía eléctrica desde cultivos energéticos (maderables y herbáceos) en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano, incluye la utilización de bases de datos georreferenciadas mediante un sistema de información geográfico que brinda un marco de análisis multicriterio novedoso y replicable. Esto permite la evaluación cruzada del potencial en relación a factores considerados limitantes o críticos en el sitio de estudio. Por último, el CASO V propone la formulación de una herramienta de cálculo genérica para estimar el potencial de generación energética a partir de diferentes recursos de biomasa, elaborada a partir de factores de residuo/producto y su inclusión en sencillos modelos matemáticos.

Esta sección no solo revisa, aplica y ejemplifica herramientas, modelos y técnicas concretas, sino que permite apreciar su utilidad y alcance con resultados obtenidos en diferentes localidades de la Región. Se agregan además, reflexiones y comentarios para que los aportes resulten en Buenas Prácticas replicables en otras realidades regionales.

Referencias

- World Bioenergy Association (WBA) 2019. Global bioenergy statistics 2019. Disponible en: https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_LQ.pdf (21 de octubre de 2020).
- International Energy Agency (IEA) 2020. Energy Technology Perspectives 2020. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> (21 de octubre de 2020).

CASO I. Evaluación energética de residuos procedentes de la producción de mezcal en Michoacán, México.

Janitzi Marlene Sánchez Rodríguez¹, René Martínez Bravo², Raúl Jesús Tauro^{3*}

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Morelia, Michoacán, 58000, México.

² Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES-UNAM), Morelia, Michoacán, 58000, México.

³ Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM), Morelia, Michoacán, 5800, México.

Resumen. El mezcal es una bebida destilada tradicional de México, elaborada a partir de 56 especies de agaves nativos y domesticadas. Su producción aumentó 5 veces en los últimos años y se espera siga en aumento debido a la creciente demanda nacional e internacional. Existe poca información sobre el manejo de los residuos generados en el proceso de producción del mezcal. En este trabajo se estimó el potencial energético de dichos residuos en un caso de estudio en Michoacán, México, utilizando el *Agave inaequidens* como materia prima. Se determinaron los índices de generación de residuos (CRI) primarios y secundarios mediante mediciones directas en campo y se estimó el potencial de generación de biomasa y el potencial energético de los residuos, evaluando su posible uso como bioenergía. Nuestros resultados demuestran que el *Agave inaequidens* genera grandes cantidades de biomasa residual en la unidad productiva analizada, superando las 16,5 toneladas de materia seca al año. El potencial energético máximo de los residuos alcanza los 304 GJ/año, mientras que el potencial técnico podría sustituir entre el 42% y 21% de la energía requerida para la etapa de destilación. El uso de residuos biomásicos para la sustitución de combustibles fósiles en el proceso de producción del mezcal, sería una solución que mitigaría impactos ambientales negativos y generaría beneficios sociales y económicos, principalmente a los pequeños productores.

*Correspondencia: Raúl Jesús Tauro- rjtauro@gmail.com

1. Introducción

El mezcal es una bebida alcohólica tradicional de México, obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos del tallo y bases foliares (piña) de magueyes maduros. Su consumo y producción va en aumento a nivel nacional e internacional. La producción nacional se ha multiplicado por 5 en los últimos 7 años (CRM, 2020). A nivel internacional, el mezcal se exporta actualmente en 68 países, siendo Estados Unidos el principal destino.

México cuenta con la denominación de origen del mezcal, la cual protege la propiedad intelectual de 39 municipios de 10 estados; Durango, Guanajuato, Guerrero, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas, Zacatecas, Michoacán, y los recientemente incorporados Puebla y Estado de México (Figura 1). Actualmente se emplean más de 56 especies de agave para la producción de mezcal (Colunga-García Marín *et al.*, 2017), la mayoría de ellas aprovechadas de manera silvestre (Torres *et al.*, 2015a-b).

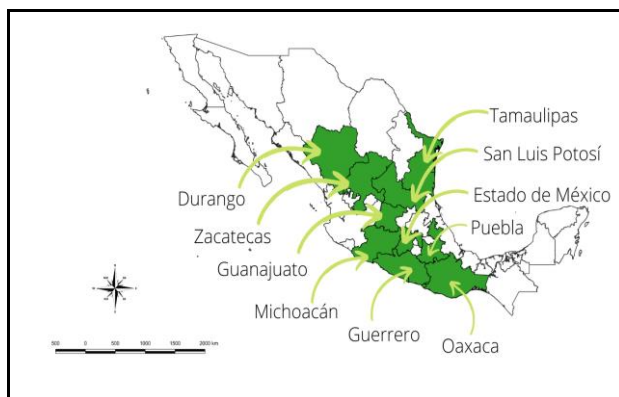


Figura 1. Estados que cuentan con Denominación de Origen en México. Fuente: Elaboración propia con datos de CRM (2020).

A pesar de que el estado de Oaxaca produce el 90% del mezcal a nivel nacional (CRM, 2020), Michoacán se encuentra entre los estados de mayor producción. De manera extraoficial, se estima que hay más de 80 fábricas de mezcal en Michoacán, las cuales producen aproximadamente 400 mil litros al año, destinados en su mayoría al consumo local (AGARED, 2017), aunque su exportación está creciendo a ritmo acelerado. En el estado se utilizan principalmente cinco especies de agave para la producción de mezcal, algunas de ellas se distribuyen de manera natural o silvestre en diferentes ecosistemas, como el maguey chino (*Agave cupreata*), el maguey alto o bruto (*Agave inaequidens ssp. inaequidens*) y el espadín (*Agave angustifolia*); mientras que el maguey manso o cenizo (*Agave americana var. subtilis*) y el agave azul tequilero (*Agave tequilana*) son especies cultivadas.

El *Agave inaequidens* juega un papel importante en diversas comunidades rurales de Michoacán, donde, entre sus múltiples usos, la producción de mezcal destaca por sus grandes impactos culturales, económicos y ecológicos (Torres *et al.*, 2015a). Sus hojas lanceoladas (con forma de lanza) son grandes y largas, de 55 a 130 cm de largo y de 11 a 24 cm de ancho, de cara interior casi plana o cóncava, carnoso-subcoriáceas, las cuales tienen un uso muy limitado como forraje o para la obtención de fibras (Torres *et al.*, 2015b), siendo mayormente dejadas en campo después de la cosecha de la planta.

Actualmente, la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016 (NOM, 2016), "Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones", correspondiente a la Denominación de Origen Mezcal, clasifica ciertas categorías de mezcal de acuerdo a la maquinaria, el equipamiento, o la infraestructura usada en cada proceso de producción (Maciel-Martínez *et al.*, 2020). Esta clasificación corresponde con mezcal ancestral, mezcal artesanal y mezcal, aumentando la participación de equipos, insumos y materiales industriales, como el acero inoxidable, en cada uno de ellos. Por ejemplo, el mezcal ancestral limita el uso de biomasa como combustible en sus procesos, mientras que el mezcal industrializado permite el uso de autoclaves a base de combustibles fósiles.

La producción de mezcal comienza con la obtención de la materia prima, donde además del agave, la leña cumple un papel importante en los procesos de horneado y destilado, mientras que el agua es indispensable para la fermentación y destilación. El primer paso para la obtención de la bebida es el corte o jima, donde se cortan las hojas por medio de la coa (objeto semicircular de metal afilado y con un mango de madera para su sujeción) o machetes (Figura 2), posteriormente se corta la base del tallo y se extrae la cabeza o piña usando generalmente un hacha. Posteriormente, las piñas son trasladadas a la vinata para los procesos de cocción.



Figura 2. Proceso de jima. (Foto: Issac Meza, 2020, Etúcuaro, México).

Según la NOM (2016), la elaboración de cada uno de los tipos de mezcal debe cumplir con al menos las siguientes cuatro etapas, detalladas a continuación; cocción, molienda, fermentación y destilación.

a) **Horneado o Cocción:** Consiste en el cocimiento de cabezas o jugos de maguey o agave en hornos de pozo (Figura 3), mampostería o autoclave. El objetivo de este proceso es la separación de las cadenas de carbohidratos en azúcares más simples de tal manera que se pueda fermentar de manera más sencilla. Los hornos de pozo se hacen en el suelo, tienen forma de cono y consisten en una cavidad de 6-12 m de diámetro y de 2-4 m de profundidad. Su funcionamiento consta de colocar leña de diferentes tamaños en el fondo del pozo, la cual es recubierta por una capa de piedra volcánica y sobre ésta se cargan las cabezas de maguey. Al encenderse la madera las piedras se tornan al rojo vivo, transmitiendo el calor al maguey. Por último, el horno cargado es recubierto con tierra formando un montículo, pudiendo durar tapado en tarea de cocción de tres a cinco días, García *et al.* (2017).



Figura 3. Horno de pozo. (Foto: Marlene Sánchez, 2020, Etúcuaro, México).

b) **Molienda:** El proceso de molienda tiene como objetivo desmenuzar los trozos de agave cocido para extraer los jugos y facilitar la etapa posterior de fermentación. De acuerdo a la NOM (2016), la molienda debe realizarse en un molino tahona, trapiche, desgarradora, tren de molinos o difusor. En algunos casos, este proceso se realiza con un pequeño molino de rastrojos con motor de gasolina, o de forma artesanal usando un hacha dentro de una batea o canoa de madera.

c) **Fermentación:** Esta etapa se realiza en recipientes o tinajas de madera, piletas de mampostería o tanques de acero inoxidable. La preparación de las tinajas se realiza agregando una determinada cantidad de agave molido (machacado o desmenuzado) y dejando reposar por 1 o 2 días hasta obtener un aroma alcohólico. Posteriormente, se le adiciona un poco de agua a temperatura ambiente hasta tapan la tina y se deja fermentar desde 3 hasta 15 días, obteniendo un mosto. La

fermentación tiene como objetivo la transformación de los azúcares en alcohol mediante la acción de las levaduras y otros microorganismos que se encuentran en la materia prima de manera espontánea (Martínez-Palacios *et al.*, 2015).

d) **Destilación:** Según la NOM (2016), este proceso se debe realizar en alambiques, destiladores continuos o columnas de cobre o acero inoxidable. Los destiladores están formados de cuatro partes principales: la hornilla, que es donde se lleva a cabo la combustión de la leña que genera el calor para la destilación; el “cazo”, que es donde se deposita y hierve el mosto fermentado; el alambique, donde se reciben los vapores resultantes de la ebullición del mosto; y el condensador que se encuentra en la parte superior del alambique y está constantemente irrigado por la parte exterior con agua corriente; su función es enfriar el vapor alcohólico y condensar para depositarlo en un recipiente que recibe los productos de la condensación y los dirige hacia afuera del alambique hacia un contenedor donde se recibe el destilado (Toral-Paz *et al.*, 2015).

De esta forma, se separan del mosto los compuestos volátiles como el etanol y el agua. La destilación se realiza en dos etapas, en la primera se obtiene un producto de bajo contenido alcohólico (25-30% de alcohol), y en la fase final se obtiene el mezcal entre 50 y 65% de alcohol (García *et al.*, 2017). Para la producción de mezcal ancestral, además de la leña, se puede incluir como combustible el bagazo del agave, mientras que para el mezcal industrializado se puede incluir el uso de la autoclave (NOM, 2016) alimentada con vapor producido por calderas a base de combustibles fósiles.

2. Problema detectado y situación de partida

El aumento en la demanda de mezcal genera problemas de escasez de recursos en las comunidades, principalmente por la necesidad de agua y la extracción de leña como recurso energético, (Torres *et al.* 2015b). Bajo un enfoque energético, el *A. inaequidens* ha sido poco estudiado en la actualidad, existiendo poca información bibliográfica respecto al consumo de leña para su procesamiento y al manejo de sus residuos.

En la producción del mezcal se generan dos tipos principales de residuos. En la jima del agave quedan como residuos las hojas, mientras que en la destilación quedan las fibras (bagazo). Estos residuos están compuestos principalmente por fibra leñosa (lignina, celulosa y hemicelulosa) y tardan hasta ocho años para su completa biodegradación (Toral-Paz *et al.* 2015). En la mayoría de los casos, estos residuos no tienen un uso formal, y son vertidos en tiraderos a cielo abierto o almacenados en los establecimientos. Esto genera problemas de salubridad a los productores, e importantes impactos ambientales por la presencia de hongos, bacterias y animales indeseables (Toral-Paz *et al.*, 2015).

Por otro lado, tanto la cocción de las piñas como el proceso de destilación demandan grandes cantidades de leña o subproductos de la industria forestal, ocasionando presión sobre los bosques por el uso de madera. El horneado es el proceso de mayor demanda energética, consumiendo principalmente leña de encino (en Mi-

choacán). Además, existen algunas empresas que utilizan GLP en el proceso de destilación, uno de los combustibles fósiles más costosos en México, generando dependencia energética, impactos ambientales y merma de la economía en las industrias. Existen muy pocos estudios que cuantifiquen y revaloricen los residuos generados en el proceso de producción del mezcal, y menos aún, estudios que evalúen posibilidades de ahorro energético por sustitución de combustibles en las empresas destiladoras.

Este trabajo consistió en la cuantificación de residuos generados en la producción de mezcal mediante un estudio de caso en Michoacán, México, utilizando el *Agave inaequidens* como materia prima. En primer lugar, se determinaron los índices de generación de residuos (CRI) primarios y secundarios mediante mediciones directas en campo. Posteriormente, se estimó el potencial de generación de biomasa y el potencial energético de los residuos. Por último, se evaluó su posible uso a escala local, discutiendo las estrategias para impulsar su aprovechamiento bajo las condiciones sociales y tecnológicas de la región.

3. Metodología y resultados

3.1. Área de estudio

La empresa "La Flor del Mezcal" es una de las productoras de mezcal más grandes y reconocidas en el Estado de Michoacán, produciendo aproximadamente 10.000 litros al año. La empresa cuenta con un establecimiento en la localidad de Etúcuaro, Michoacán y parte de su producción proviene de *A. inaequidens*, mismo que se extrae de manera silvestre en el municipio de Huiramba, Michoacán, previas negociaciones con los dueños de los terrenos donde se distribuye (Figura 4).

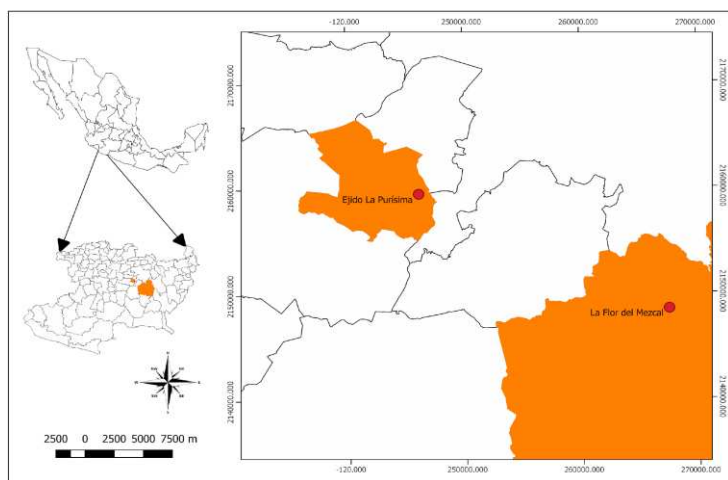


Figura 4. Ubicación del área de estudio en el estado de Michoacán, México. Elaboración propia con datos de CONABIO (2020).

Etúcuaro, municipio de Madero, se ubica en la zona de transición entre la sierra y el descenso a la tierra caliente michoacana, con un clima anual promedio de 25 °C. Cuenta con 1.146 habitantes y se encuentra ubicado a 1.550 metros sobre el nivel del mar. Tiene una extensión territorial de 1.318 ha; de las cuales 120 corresponden a pequeñas propiedades, 825 son tierras comunales y 364 son tierras ejidales (INEGI, 2020; Hernández-López *et al.*, 2017). Medios informativos, en varias ocasiones se han referido a esta localidad como “La cuna del mezcal artesanal en Michoacán”. En cuanto al municipio de Huiramba, tiene una superficie de 79,23 km², cuenta con 17 localidades y una población total de 7.369 habitantes. Se localiza al centro del Estado, a una altura de 2.100 metros sobre el nivel del mar. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2009).

3.2. Cuantificación de residuos

De acuerdo con la metodología de Valdez-Vazquez *et al.* (2010), los residuos de cultivos se dividieron en dos categorías: (a) residuos de cultivos primarios (PCR), incluidos los residuos que quedan en el campo después de la cosecha, y (b) residuos secundarios (SCR) generados en el proceso de producción del mezcal. Bajo esta clasificación se considera para este trabajo que las hojas del agave son residuos primarios (PCR) y el bagazo el residuo secundario (SCR).

La cuantificación de residuos se realizó en dos etapas: a) cuantificación de residuos primarios en campo (Figura 5a), y b) cuantificación de residuos secundarios en planta. En el campo se ubicó la población silvestre de *A. inaequidens*, donde mediante un muestreo aleatorio se seleccionaron 14 plantas bajo la asesoría de los jimadores y supervisión del maestro mezcalero (Figura 5b). Para el caso de los residuos secundarios en la destilería, pasado el tiempo de cocción y destilación de las piñas, se recolectó y pesó todo el bagazo contenido en los destiladores.



Figura 5. Plantas de agave: a) pesado de hojas de agave en campo y b) distribución de *A. inaequidens* en la zona de estudio (Fotos: Issac Meza, 2020, Huiramba, México).

El resultado del peso húmedo promedio de las piñas muestreadas fue de 55,8 kg, y de 80,7 kg para las hojas. En la Figura 6 se puede observar que en la mayoría de las muestras recolectadas, el peso húmedo de las hojas es mayor al de la propia

piña. Como se mencionó anteriormente, el *Agave inaequidens* es una especie poco estudiada desde un enfoque energético, y existe poca información bibliográfica que permita generar una comparación de resultados. Sin embargo, a modo de analizar los resultados obtenidos se realizaron comparaciones con otras especies de agave similares.

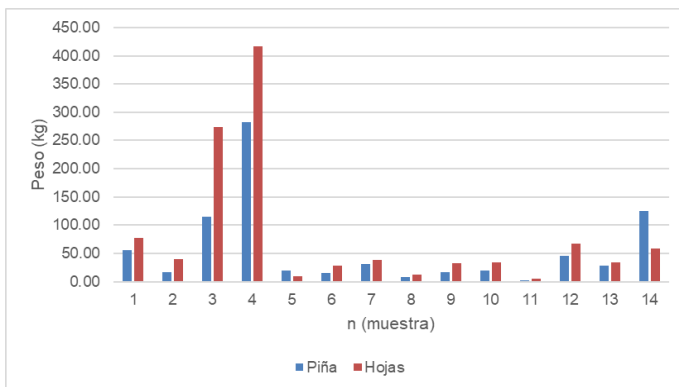


Figura 6. Resultados del pesaje de las muestras (piña y hojas). Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en campo.

Iñiguez-Covarrubias *et al.*, (2001) en su estudio de *Utilización de subproductos de la industria del tequila. Parte 2: valor potencial de las hojas de A. tequilana*, afirma que el peso promedio de la piña del *A. tequilana* va de 30 a 70 kg, aunque obtuvieron piñas de hasta 150 kg. Estos valores coinciden con nuestros resultados, donde el peso de las piñas van desde 2 kg hasta 281 kg, promediando los 56 kg como se comentó anteriormente. Iñiguez-Covarrubias *et al.*, (2001) también afirman que las hojas representan del 45 al 50% del peso total de la planta. Basados en los valores promedio determinados en nuestro estudio, las hojas representan el 59% del peso total de la planta.

En la recolección y medición de la cantidad de bagazo, se obtuvieron 432 kg (peso húmedo) en cada proceso de destilación, es decir, cada 6 toneladas de piña cocida. El bagazo representa el 14% del peso total de la planta. Considerando que se realizan alrededor de 20 destilaciones por año, se estimó que la cantidad de bagazo generado en nuestro caso de estudio es de 8,6 toneladas anuales. Esto coincide prácticamente con lo que señalan Toral-Paz *et al.*, (2015), quienes estimaron que la producción de bagazo en la región de Madero es de 213 toneladas anuales y que, de forma individual, un solo productor puede generar aproximadamente 11 toneladas anuales. Esta diferencia de resultados puede deberse a que los datos de Toral-Paz *et al.* (2015) se estimaron con base en entrevistas a los mezcaleros. Esto demuestra la importancia de hacer mediciones en campo para obtener datos de primera mano, como se ha generado en este trabajo.

3.3. Índice de Generación de Residuos

Se determinaron dos índices de generación de residuos (CRI), uno primario (PCR) y otro secundario (SCR). Tal como lo define Rosillo-Calle *et al.* (2012), el CRI se define como la relación del peso seco de los residuos producidos sobre la cosecha total producida, mismo que se definió con la Ecuación 1 y Ecuación 2 tomando en cuenta las consideraciones anteriores para cada tipo de residuo.

$$CRI_{PCR} = \frac{t_{residuo}}{t_{cosecha}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

CRI_{PCR} : Índice de residuos de cultivos primarios.

$t_{residuo}$: Peso seco de los residuos producidos; hojas.

$t_{cosecha}$: Peso de la cosecha total producida; piñas.

$$CRI_{SCR} = \frac{t_{residuo}}{t_{cosecha}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

CRI_{SCR} : Índice de residuos de cultivos secundarios;

$t_{residuo}$: Peso seco de los residuos que se generaron procesando las porciones cosechadas del cultivo; bagazo.

$t_{cosecha}$: Peso de la cosecha total producida; piñas.

Para obtener el peso seco de los residuos, el contenido de humedad de los mismos se determinó de acuerdo con la norma en ISO 18134-1:2015 (UNE, 2016) para biocombustibles sólidos. El contenido de humedad promedio de las muestras fue de 92% para los residuos primarios y 81% en los residuos secundarios.

El CRI calculado para los residuos primarios (PCR) fue de 0,11. Este valor puede ser comparable con otros índices de algunos cultivos importantes en el país. Honorato-Salazar y Sadhukhan (2019) reportan los CRI de los principales cultivos agrícolas en México los cuales se muestran en la Figura 8. El CRI primario obtenido en este trabajo podría considerarse menor al de otros cultivos que se muestran en dicha Figura, principalmente si es comparado con las hojas de agave para la producción de tequila (0,2). Esta diferencia puede deberse al alto contenido de humedad de las hojas determinado en este estudio (92%). Jiménez-Munóz *et al.* (2016) reportan que el contenido de humedad del *A. tequilana* es de 83,4%. Esta diferencia afectaría directamente el coeficiente de residuos.

El valor calculado para el CRI de los residuos secundarios (SCR) fue de 0,028. Este valor es bajo en comparación con otros índices, incluso está lejos del CRI del bagazo de agave para producción de tequila (0,12) y del bagazo de agave para producción de mezcal (0,12) reportados por Salazar y Sadhukhan (2019) (Figura 7). Esta diferencia podría estar relacionada con que los valores de producción de piñas se determinó de acuerdo a datos obtenidos del maestro mezcalero de "La Flor del

Mezcal” (T. Sánchez, *com. pers.* 2020). Para futuros trabajos, a manera de mejorar la información de primera mano y los resultados obtenidos, es importante pesar las piñas antes del proceso de cocción.

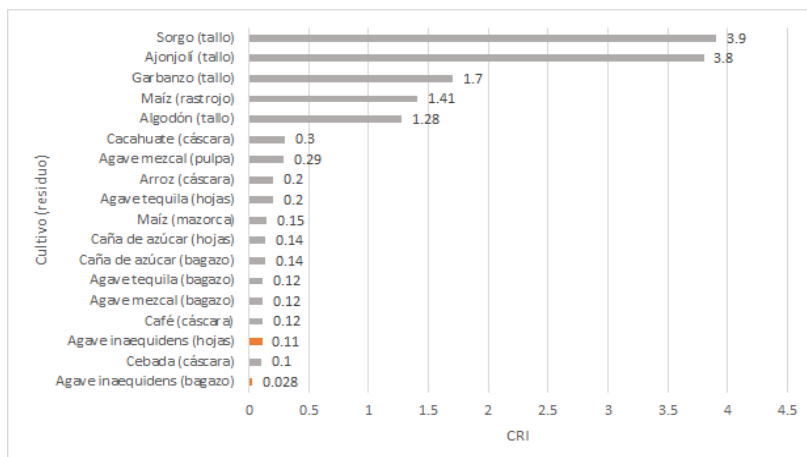


Figura 7. Coeficiente de residuos de los principales cultivos en México en comparación con el Agave inaequidens. Fuente: elaboración propia con datos de Honorato-Salazar y Sadhukhan (2019).

3.4. Potencial de generación de residuos

Para determinar el potencial de generación de residuos se usó la metodología de González-Hernández (2010), donde señala que el potencial de biomasa agrícola se evalúa mediante la determinación de un coeficiente específico de residuos (CRI) para cada cultivo considerado, basado en sus volúmenes de producción anual o superficies agrícolas cosechadas.

Para determinar el potencial de generación de residuos de este estudio, se definieron las siguientes ecuaciones (Ecuación 3 y 4):

$$G_{PCR} = CRI_{PCR} * R_{CULTIVO} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

G_{PCR} : Potencial de generación de residuos primarios.

CRI_{PCR} : Índice de residuo determinado en la ecuación 1.

$R_{CULTIVO}$: Volumen de producción del cultivo (t); agave.

$$G_{SCR} = CRI_{SCR} * R_{CULTIVO} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

G_{SCR} : Potencial de generación de residuos secundarios.

CRI_{SCR} : Índice de residuo determinado en la ecuación 2.

$R_{CULTIVO}$: Volumen de producción del cultivo (t); agave

El volumen de producción del cultivo se determinó utilizando datos obtenidos en Comunicación Personal con el maestro mezcalero de "La Flor del Mezcal". Se obtuvieron los siguientes datos; para producir 500 litros de mezcal se usan aproximadamente 6 toneladas de piña de *A. inaequidens*, y se realizan como mínimo 20 destilaciones al año. Dicho esto, se pudo estimar un volumen de producción igual a 120 toneladas de piñas al año. Con este valor se estimó un potencial de generación de residuos primarios igual a 13,2 toneladas de materia seca (tMS), y un potencial de residuos secundarios de 3,3 tMS anuales, generando en total 16,5 tMS al año.

3.5. Potencial energético de los residuos

El potencial energético de la biomasa se obtiene a partir de la relación que existe entre la masa de residuo seco y el contenido energético por unidad de masa de dicho residuo, o Poder Calorífico Inferior (PCI). Chum *et al.* (2011) clasifican los potenciales energéticos en: **Potencial energético teórico**, se entiende como el máximo contenido energético posible de aprovechar toda la biomasa seca generada, relacionando la superficie sembrada, el rendimiento, el coeficiente de generación del residuo, y el poder calorífico inferior del residuo en base seca, y el **potencial energético técnico**, que describe la energía máxima que se puede obtener de la biomasa realmente disponible para este fin, se obtiene multiplicando el potencial energético teórico por un factor de uso y una tasa máxima de extracción. El potencial energético técnico, a diferencia del potencial energético teórico, considera como limitaciones las barreras técnicas de las prácticas de producción de biomasa, por ejemplo: técnicas de cosecha, o infraestructura y accesibilidad. También considera la demanda simultánea de alimentos, forraje, productos forestales y requerimientos de áreas para infraestructura humana. Las restricciones relacionadas a la conservación de la naturaleza y a la preservación del suelo, agua y biodiversidad también pueden ser consideradas bajo el término de "potencial sustentable" Chum *et al.* (2011).

Para la determinación del potencial teórico de los residuos cuantificados en este trabajo, se utilizaron los siguientes datos del poder calorífico:

Tabla 1. Poder calorífico inferior (PCI) de los residuos.

Residuo	Poder calorífico (MJ/kgbs*)	Referencia
Hojas de agave	18,84	PROYCLON (2017)
Bagazo	16,96	Parascanu <i>et al.</i> (2017)

*bs: base seca. Fuente: Elaboración propia.

El potencial energético teórico se determinó usando la Ecuación 5 y Ecuación 6, adaptadas de Vis y Van Den Berg (2010) y González-Hernández (2010):

$$PTR_{PCR} = PCI_{PCR} * G_{PCR} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

PT_{PCR} : Potencial teórico de los residuos primarios.

PCI_{PCR} : Poder calorífico inferior de los residuos primarios.

G_{PCR} : Potencial de generación de los residuos primarios determinado con la Ec. 3.

$$PTR_{SCR} = PCI_{SCR} * G_{SCR} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

PT_{SCR} : Potencial teórico de los residuos secundarios.

PCI_{SCR} : Poder calorífico inferior de los residuos secundarios.

G_{SCR} : Potencial de generación de los residuos secundarios (según Ec.4).

A modo de obtener un potencial energético técnico que sea conservativo, se pueden contemplar las siguientes consideraciones. La obtención de hojas de agave, al dejarse en campo después de la jima podría considerar varias limitaciones que pueden estar relacionadas con las técnicas de cosecha, accesibilidad y preservación del suelo. Para el caso de los residuos secundarios, Garza-Elizondo, 2016, señala que el bagazo de agave se podría utilizar comúnmente como composta y alimento del ganado.

Bajo las consideraciones anteriores, el potencial energético de los residuos primarios y secundarios se determinó considerando dos escenarios. Para los residuos primarios se utiliza la Ecuación 7, contemplando tasas parciales de extracción en campo, principalmente para conservar el contenido de carbono en el suelo. Se analiza un escenario optimista (E1) que considera que la mitad de los residuos se pueden extraer de campo, y un escenario conservador (E2) considerando una tasa de extracción menor (Tabla 2). En los dos casos se contempla que todo el residuo resultante se puede usar con fines energéticos.

$$PT_{PCR} = PTR_{PCR} * TE_{PCR} * FU_{PCR} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

PT_{PCR} : Potencial energético técnico de los residuos primarios.

PTR_{PCR} : Potencial energético teórico de los residuos primarios (según Ec.6).

TE_{PCR} : Tasa de extracción máxima de los residuos primarios.

FU_{PCR} : Factor de uso de los residuos primarios.

Para los residuos secundarios, se utiliza la Ecuación 8 y de igual manera que en el caso anterior, se considera un escenario optimista (E1) y uno conservador (E2) en función del potencial de uso del bagazo (Tabla 3).

Tabla 2. Consideraciones para la determinación del potencial energético técnico para los residuos primarios.

	E1	E2
Tasa de extracción máxima	50%	25%
Factor de uso	100%	100%

$$PT_{SCR} = PTR_{SCR} * TE_{SCR} * FU_{SCR} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

PT_{SCR} : Potencial energético técnico de los residuos secundarios.

PTR_{SCR} : Potencial energético teórico de los residuos secundarios determinado con la ecuación 7.

TE_{SCR} : Tasa de extracción máxima de los residuos secundarios.

FU_{SCR} : Factor de uso de los residuos secundarios.

Tabla 3. Consideraciones para la determinación del potencial energético técnico para los residuos secundarios.

	E1	E2
Tasa de extracción máxima	100%	100%
Factor de uso	50%	25%

El potencial energético teórico (máximo) de los residuos primarios y secundarios alcanza los 304 GJ/año, aplicando las ecuaciones 5 y 6. Los resultados correspondientes al potencial técnico de ambos residuos se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 4. Potencial técnico de residuos primarios y secundarios en los dos escenarios (E1, E2).

Potencial técnico	E1	E2
Residuos primarios (GJ/año)	124	62
Residuos secundarios (GJ/año)	62	14
TOTAL (GJ/año)	186	76

3.6. Usos potenciales de los residuos

Una vez determinado el potencial energético que podría obtenerse de los residuos cuantificados, el uso potencial de los mismos se evaluó de acuerdo con dos enfoques:

-
- a) Comparando el potencial energético obtenido con el uso actual de energía en la vinata durante el proceso de destilación, evaluando su autosuficiencia energética.
 - b) Proponiendo otros usos energéticos, analizando diferentes tecnologías de aprovechamiento.

- **Autosuficiencia energética**

Derivado de la comunicación personal con el maestro mezcalero del caso de estudio, se sabe que en "La Flor del Mezcal" durante la etapa de destilación, se requieren alrededor de 1.000 kg de leña seca por destilado para producir 500 L de mezcal. Se consideró que la leña tiene un poder calorífico en base seca igual a 18 MJ/kg (FAO, 2019) y que se producen 20 destilaciones al año. Con estas consideraciones se estima que en el proceso de destilación se consume aproximadamente 36 MJ de energía proveniente de la leña, por litro de mezcal producido al año (360 GJ/año), siendo menor a los 72 MJ/litro de mezcal determinados por Maciel-Martínez *et al.* (2020) para el proceso de destilación del *Agave Cupreata*.

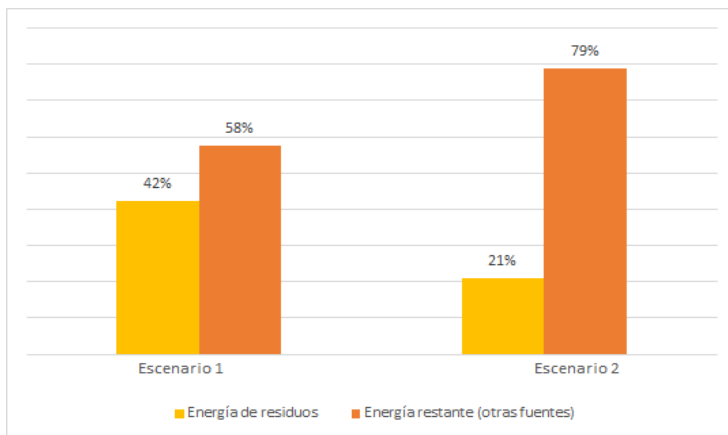


Figura 8. Abastecimiento de energía en el proceso de destilación (potencial técnico). Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se determinó que el potencial energético teórico o máximo anual de los residuos primarios y secundarios alcanza los 304 GJ/año, con lo cual se podría cubrir el 85% de la energía requerida en la etapa de destilación. Analizando los resultados del potencial técnico, se podría cubrir el 42% y 21% de la energía utilizada en la destilación (Figura 8) según los escenarios considerados. Sin embargo, la sustitución de energía fósil por biomasa en la destilación del mezcal implica el uso de nuevas tecnologías que deben afrontar, entre los factores más importantes, resistencia social al cambio técnico y tecnológico.

- **Otras alternativas de utilización**

- Pellets y briquetas:

Toral-Paz *et al.* (2015), consideran la elaboración de estos biocombustibles como una actividad alterna a la producción de mezcal, tanto para productores individuales o asociados. Como se mencionó anteriormente, los residuos de la producción de mezcal alcanzan valores de poder calorífico aceptables para su uso como biomasa sólida, superando los 16 MJ/kgbs en el bagazo, y llegando incluso a los 18,8 MJ/kgbs en las hojas del maguey.

Sin embargo, dichos residuos contienen elevados porcentajes de humedad, superando el 80% de agua por kg de biomasa. Considerando que la materia prima para producir pellets requiere una humedad cercana al 10%, sería necesario consumir grandes cantidades de energía para el secado de los residuos. Lo anterior impactaría directamente en los costos de inversión y operación para el densificado de los residuos, o bien amplios tiempos de secado (Lehtikangas, 2001).

A escala nacional, hasta el momento se han realizado esfuerzos aislados para el aprovechamiento de los residuos de agave, considerando la densificación como una alternativa para el manejo de dichos residuos. Sin embargo, los proyectos no progresaron por falta de un mercado claro de usuarios finales. Para que los proyectos sean exitosos, es necesario considerar el desarrollo tecnológico local, o identificar posibilidades de transferencia tecnológica para generar dispositivos de uso final que se adapten a las características de los combustibles locales y a las necesidades específicas de los usuarios. Desde el sector público, un catalizador clave sería el apoyo de políticas públicas que permitan ingresar a los biocombustibles al mercado energético.

- Biocarbón (biochar):

El biocarbón es un producto sólido que se obtiene por pirólisis, es decir, tras inducir una combustión incompleta de la biomasa bajo un aporte de oxígeno limitado. Para ello, el contenido de humedad de la biomasa debe ser bajo, comprendido entre 5 a 17%. Para el alto contenido de humedad de los residuos del maguey, este producto implicaría la implementación de operaciones de secado, y al igual que en el densificado, aumentaría los costos de su aprovechamiento. No obstante, considerando que el poder calorífico del biochar es mayor al de la biomasa sin tratar, podría aportar una mayor cantidad de energía por unidad de masa (MJ/kg de material), o podría aprovecharse para usos no energéticos, como enriquecedor de suelos en las parcelas productoras de agave cultivado (Orozco-Gutiérrez y De Lira-Fuentes, 2020).

- Biogás:

Como se ha comentado anteriormente, los residuos con alto contenido de humedad antes del proceso de conversión energética, requieren reducir su contenido de humedad. En el caso de la producción de biogás, es óptimo el uso de residuos con más del 50% de humedad mediante procesos de fermentación o digestión anaerobia. Por su parte, Gómez-Guerrero (2014) evaluó el porcentaje de biogás producido a partir de los residuos de la producción del mezcal en el estado de Oaxaca, em-

pleando el bagazo y las vinazas del *A. angustifolia* Haw a través de un sistema de tratamiento anaerobio a nivel laboratorio. Dicho trabajo concluyó que el bagazo y las vinazas constituyen una fuente viable para producción de biogás debido a su elevada humedad (>90%) y alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable. Igual que en los casos anteriores, para el aprovechamiento energético de los residuos por medio de la producción de biogás, sería necesario el desarrollo o la adaptación de tecnologías de biodigestión y la transferencia tecnológica de motores-generadores, actualmente importados.

- Bioetanol:

Si bien se han realizado algunos análisis sobre el potencial de producción de etanol a partir del bagazo de agave, existen muy pocos trabajos enfocados a experiencias prácticas, enfocados principalmente al *A. tequilana* para la producción de tequila. Montañez *et al.* (2011), señalan que debido al alto contenido de azúcares reductores totales ($52,45 \pm 2,45\%$ en peso seco), las hojas o pencas de este maguey constituyen una prometedora materia prima para la producción industrial de bioetanol. Sin embargo, es necesario bajar los costos de producción para obtener costos competitivos con los oxigenantes de gasolinas actuales.

- Usos no energéticos:

Aunque la fibra o bagazo se usa muy poco y en pequeña escala, en el trabajo de Toral-Paz *et al.* (2015) se describen los siguientes usos potenciales: artículos artesanales, rellenos de muebles y colchones, mantas orgánicas para biorremediación, adobes, sustratos, forraje, obtención de celulosa y lignina.

4. Conclusiones del estudio

La elaboración de mezcal es un proceso cultural de México que presenta oportunidades de crecimiento y mejoras energéticas. En el caso de estudio en Michoacán, el *A. inaequidens* es una especie que genera grandes cantidades de residuos biomásicos en el proceso de producción de mezcal, donde las hojas representan el 59% del peso total de la planta y el bagazo 14%. El contenido de humedad promedio fue de 92% para los residuos primarios (hojas) y 81% en los residuos secundarios (bagazo). Los resultados demuestran que existe una importante cantidad de biomasa residual con potencial de uso energético en la industria del mezcal.

El potencial de generación de residuos primarios y secundarios es nuestro caso de estudio fue de 13,2 y 3,3 toneladas de biomasa seca por año respectivamente. El potencial energético teórico (máximo) de los residuos alcanza los 304 GJ/año, siendo suficiente para cubrir el 85% de la energía requerida en la etapa de destilación. El potencial técnico para el Escenario 1 (E1) alcanza los 186 GJ/año, pudiendo cubrir el 42% de la energía anual requerida para el proceso de destilación en la vinata, mientras que para el Escenario 2 (E2), alcanza los 76 GJ/año pudiendo cubrir un 21% de la misma.

Los coeficientes de residuo obtenidos del *A. inaequidens* podrían ser aplicables a inventarios agrícolas o sistemas de información geográfica que permitan la evaluación y el desarrollo de los modelos logísticos que impulsen el uso de estos residuos

a nivel regional. Sin embargo, existe la necesidad de homogeneizar las metodologías de cuantificación de residuos, donde es imprescindible la obtención de datos de primera mano por medición en campo considerando diferentes especies de agave y tamaños de empresas.

El bagazo obtenido después del proceso de destilación, es el residuo con mayores posibilidades inmediatas de aprovechamiento energético. Sin embargo, debido a su elevado porcentaje de humedad sería adecuado en posteriores trabajos hacer un análisis tecno-económico de su pre-tratamiento y conversión energética. Además, replicar y extrapolar los resultados de este estudio de caso en otras empresas del rubro, permitiría tener una estimación de la cantidad de residuos generados y del potencial energético obtenido a escala regional.

Existen muchas industrias destiladoras de agave interesadas en reemplazar combustibles fósiles por biomasa en sus instalaciones. Para el uso energético de los residuos de agave, es necesaria la transferencia tecnológica que se adapte a las características de este recurso biomásico, además de políticas públicas e incentivos fiscales que promuevan el uso de biomasa en las industrias.

El desarrollo y la transferencia tecnológica basada en enfoques multidisciplinarios generarían soluciones que podrían satisfacer demandas específicas. Por lo pronto, es necesario continuar trabajando y mejorando las estimaciones del potencial de residuos para diferentes especies de agave, diagnosticando los tipos de procesos (ancestral, artesanal e industrial) y los distintos tamaños de industrias como los primeros pasos en este sentido.

5. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

En el contexto de la producción de mezcal, la denominación de origen que le fue otorgada a esta bebida ha propiciado la regulación de la producción dentro de la región geográfica designada. Si bien la regulación y vigilancia de los procesos de producción permite el posicionamiento del mezcal en mercados nacionales e internacionales, también crea una segmentación en los productores de la bebida debido a que las regulaciones pueden verse como una barrera para quienes no puedan ajustar sus procesos a la normativa que establece la denominación. Por lo tanto, cabe aclarar que no estar reconocido dentro de la denominación no es sinónimo de mala calidad del producto, sino que pueden existir otras razones detrás.

A partir de la denominación de origen, la producción del mezcal crece vertiginosamente para penetrar en nuevos mercados y para satisfacer la demanda en otros. Este proceso ha ocasionado una mayor demanda de materia prima, de agua y de energía, entre otros recursos. Por lo tanto, es necesario establecer medidas regulatorias en la cadena productiva y una planificación estratégica para llegar a un manejo sustentable del mezcal. Un efecto inmediato de este crecimiento es la mayor cantidad de residuos biomásicos provenientes tanto de la etapa agrícola como de la etapa industrial, los cuales pueden generar impactos negativos al ambiente, por lo que es imperativo buscar alternativas para reincorporarlos a la cadena productiva y aprovechar su potencial para uso energético.

Derivado del aumento de la demanda de mezcal, es importante que en la etapa agrícola se privilegien esquemas de conservación de la biodiversidad, sobre todo cuando se usan especies silvestres. En los cultivos de agaves, se debe poner especial atención en que la producción no genere cambios de uso de suelo, deforestación e impactos ecológicos negativos por crear monocultivos. Más acciones de esta índole, lejos de verse como barreras para su producción del mezcal, deben mirarse desde la óptica del aumento de valores agregados que esta bebida puede incorporar vinculados al cuidado del ecosistema.

Existen aspectos derivados de la denominación de origen de la elaboración del mezcal que no deben perderse de vista. Tal es el caso del uso energético de la leña en algunas etapas del proceso y la demanda de agua, porque la alta demanda del mezcal genera en consecuencia un elevado consumo de estos recursos, principalmente de leña. Esto puede ocasionar degradación forestal e incluso deforestación si no es atendido y planificado correctamente. El recurso hidrológico utilizado bajo este sistema de producción es un tema que debe tener un tratamiento similar al de la leña, para evitar la sobre explotación de los mantos acuíferos y poner en riesgo la estabilidad ecosistémica local o regional.

Desde un enfoque energético, es indispensable además buscar alternativas que permitan hacer un uso eficiente de la energía en el proceso, aprovechando y revalorizando residuos o subproductos. Con esto, se intentan garantizar procesos con bajos impactos ambientales, que sean atractivos económicamente, y que promuevan el desarrollo comunitario, beneficiando particularmente a pequeños productores y campesinos.

Para lograr todo lo mencionado, es necesario un manejo holístico del sistema de producción del mezcal involucrando en el universo social desde los productores hasta los consumidores para concientizarlos de los recursos que están implícitos en la bebida y de las medidas de sustentabilidad que incorpora su obtención. Además, es indispensable generar vínculos entre los productores, los campesinos, y las instituciones académicas y de investigación, que permitan generar soluciones integrales, a partir de las fortalezas de cada una, contemplando el diálogo de saberes y respetando la cultura de cada región.

Agradecimientos

Queremos agradecer a Trinidad Sánchez, maestro mezcalero de La Flor del Mezcal, quien generosamente nos recibió en su empresa y nos brindó información valiosa para desarrollar este estudio. Agradecemos al Dr. Ignacio Torres-García, profesor de tiempo completo en la licenciatura en Ciencias Agroforestales en la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM), Morelia, Michoacán, México. La revisión y retroalimentación del Dr. Torres-García fueron fundamentales para enriquecer este documento. Agradecemos también al Ing. Juventino Martínez, de la empresa Biointra Group, por su apoyo y compañía en las salidas de campo.

Referencias

- AGARED (2017). Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de los Agaves. *Panorama de aprovechamiento de los agaves en México* (Primera edición). ISBN: 978-607-97548-5-3, Guadalajara, México.
- Chum, A., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., ... Pingoud, K. (2011). Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Colunga-GarcíaMarín, P., Torres-García, I., Casas, A., Figueredo, C., Rangel, S., Delgado, A., Vargas, O., Cabrera, D., Zizumbo, D., Aguirre, X., Eguiarte, L., Carrillo, G. (2017). Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. Tomo 2. Investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo 22. In *Domesticación en el Continente Americano. Investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo*, **2**, 273–309. Primera edición, México.
- CONABIO (2020). Portal de Geoinformación 2020. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Recuperado de: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/Default.aspx>
- CRM (2020). Consejo Regulador del Mezcal. Denominación de origen mezcal. Recuperado de: <http://www.crm.org.mx/>.
- FAO (2019). El consumo de leña en la producción de mezcal: El caso de Santiago Matatlan, Oaxaca. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/AD096S/AD096S03.htm>
- García, A., Nieto, J., Sánchez, L., Tapia, E. (2017). Los Agaves. Panorama de aprovechamiento de los agaves en México. Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de los Agaves (AGARED) pp. 15-53.
- Garza-Elizondo, G. (2016). Transformación del bagazo de agave para el desarrollo de nuevos materiales. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la UANL.
- Gómez-Guerrero, A. (2014). Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza del *Agave angustifolia* Haw generada como residuo en la elaboración de mezcal. [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio digital DSpace.
- González-Hernández, A. (2010). Biomasa residual de la cubierta vegetal como recurso energético en la provincia de Granada. *Memoria del Mapa de Biomasa Residual Disponible*. Granada, España.
- Hernández-López, J., Guzmán-Contreras, M., Maciel-Villanueva, M. (2017). Tecnoagave 20. *Etúcuaro Michoacán, Cuna Del Mezcal Artesanal*, 5–7.
- Honorato-Salazar, J. A., Sadhukhan, J. (2019). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, **119**, 1–19. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>
- INEGI (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Catálogo de claves de entidades federativas, municipios y localidades. Microregiones. Recuperado de: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/Default.aspx>
-

-
- INEGI (2009). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Huiramba, Michoacán de Ocampo Clave geoestadística.
- Iñiguez-Covarrubias, G., Diaz-Teres, R., Sanjuan-Dueñas, R., Anzaldo-Hernández, J., Rowell, R. (2001). Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: Potential value of Agave tequilana Weber azul leaves. *Bioresource Technology*, 77(2), 101–108. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11272015>
- Jiménez-Munóz, E., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O., Rodríguez-Laguna, R. (2016). Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. *DYNA (Colombia)*, 83(197), 233–243. Recuperado de: <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.52243>
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351–360. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1).
- Maciel Martínez, J., Baltierra-Trejo, E., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., Marquez-Benavides, L. (2020). Life Cycle Environmental Impacts and Energy Demand of Craft Mezcal in Mexico. *Sustainability*, 12, 8242. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/su12198242>.
- Martínez-Palacios, A., Morales-García, J., Rodríguez, S. (2015). Aspectos sobre manejo y conservación de Agaves mezcaleros en Michoacán. UMSNH, SAGARPA, Cecti. pp. 115-125. ISBN: 9786078116430. Morelia, Michoacán, México.
- Montañez, José L, Victoria, Juan C, Flores, Rebeca, Vivar, María Á. (2011). Fermentación de los fructanos del Agave tequilana Weber Azul por *Zymomonas mobilis* y *Saccharomyces cerevisiae* en la producción de bioetanol. Información tecnológica, 22(6), 3-14. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000600002>.
- NOM (2016). Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, *Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones*. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6437/seeco11_C/seeco11_C.html
- Orozco-Gutiérrez, G., de Lira-Fuentes, R. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos proveniente de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(1), 1–9.
- Parascanu, M.M., Sandoval-Salas, F., Soreanu, G., Valverde, J.L., Sanchez-Silva, L., (2017). Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes.Renew. *Sustain. Energy Rev.* 71, 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.079>.
- PROYCLON, (2017). CIBA-IMP-INIFAP@Lignocellulosic MaterialsDatabase.
- Rosillo-Calle, F., Woods, J., De Groot, P., Hemstock, L. S. (2012). The Biomass Assessment Handbook. (Segunda Ed). Routledge. Recuperado de: <https://doi.org/10.4324/9781849772884>
- Toral-Paz, J. T., Martínez-Palacios, A., Herrera-Camacho, J., Sánchez-Vargas, N. (2015). Prospectiva estratégica para el aprovechamiento del bagazo residual de agave generado al producir mezcal en Michoacán. UMSNH- IIAF. ISBN: 978-607-9096-21-2. Morelia, Michoacán, México.
- Torres, I., Blancas, J., León, A., Casas, A. (2015a). TEK, local perceptions of risk, and diversity of management practices of Agave inaequidens in Michoacán, Mex-
-

-
- ico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **11**, 21.
<https://doi.org/10.1186/s13002-015-0043-1>
- Torres, I., Casas, A., Vega, E., Martínez-Ramos, M., Delgado-Lemus, A. (2015b). Population Dynamics and Sustainable Management of Mescal Agaves in Central Mexico: Agave potatorum in the Tehuacán-Cuicatlán Valley. *Economic Botany*, **69**(1), 26–41. <https://doi.org/10.1007/s12231-014-9295-2>
- UNE (2016). Solid biofuels. Determination of moisture content. Oven dry method: Total moisture. Reference method (ISO 18134-1:2015).
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal*, **14**, 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- Vis, M. W. y Van Den Berg, D. (2010). Harmonization of biomass resource assessments - Best Practices and Methods Handbook. Freiburg, Germany.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso II, 2021: 37-56
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO II. Potencial técnico bioenergético de residuos forestales en el Campo Experimental Agroforestal Trevelin, Argentina

Martin O. Honorato^{1*}, Silvina M. Manrique²

¹ *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agroforestal Esquel, Ruta Prov.34 km 9, Trevelin Chubut, 9203, Argentina.*

² *Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina.*

Resumen. En la Patagonia Argentina, donde la demanda energética para calefacción es muy elevada, las distancias, las condiciones climáticas y la topografía dificultan el tendido de los servicios energéticos básicos. La leña, proveniente principalmente del bosque nativo y con dificultades de fiscalización, es la principal fuente de calefacción en hogares, sobre todo por su accesibilidad y costo bajo o nulo. Otros residuos derivados de la foresto industria no son utilizados. En este capítulo se resume un estudio de caso que genera información para promover el uso de biomasa en una escala real, brindando además valiosas herramientas metodológicas que pueden ser útiles y re-adaptables en casos semejantes. Nuestro objetivo es la promoción del manejo adecuado de la biomasa residual generada a campo desde plantaciones y en aserradero, para su utilización con fines térmicos, a fin de sustituir la biomasa tradicional desde bosques nativos y las fuentes fósiles utilizadas actualmente, así como también revitalizar el manejo de las plantaciones. En base a las estimaciones realizadas, el potencial energético con que se cuenta anualmente a partir de la biomasa disponible casi sextuplica la demanda térmica anual estimada para el sitio de estudio. El uso del recurso para calefacción requiere de una mejora en la tecnología para su utilización con este fin.

*Correspondencia: Martin O. Honorato. E-mail: honorato.martin@inta.gov.ar

1. Introducción

1.1. Contexto nacional

Argentina cuenta con un gran potencial para la generación de energía a partir de fuentes renovables. En las últimas décadas, se ha ido desarrollando un marco político de respaldo para su promoción. En 1998 se declara de interés nacional la energía solar y eólica (Ley Nac. 25.019), agregándose las fuentes geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás en 2007 (Ley 26190) y realizando modificaciones en 2015 (Ley Nac. 27191) con el objetivo de fomentar el uso, y con ello lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el 20% del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025. Sin embargo, la participación de las renovables es baja aún, llegando en caso excepcional al 10% en 2020 -porcentaje que se incrementó bruscamente como consecuencia de la reducción de uso de fósiles durante el confinamiento por la pandemia COVID19- (CAMESA, 2021), destacándose un aumento en los últimos años en las tecnologías menos costosas (solar y eólica). La biomasa participa con un 3% de la energía generada, mientras que la eólica y solar lo hacen en un 84%, a pesar de que existen una oferta nacional de otros recursos de biomasa como residuos de cultivos, de procesos industriales y otros (FAO, 2020a).

Este marco nacional puede resultar favorable en particular para una región como la patagónica andina, donde desde hace décadas se ha instrumentado un sistema de promoción a las forestaciones para disminuir la presión sobre los bosques nativos. Más recientemente, se promueven prácticas silvopastoriles en estos últimos, manifestándose la oportunidad para el manejo adecuado del capital forestal existente mediante el aprovechamiento dendroenergético de los residuos. Sin embargo, la presencia de residuos lignocelulósicos provenientes de la industria maderera y del manejo de los bosques todavía no es una alternativa utilizable en la zona debido a escalas, accesibilidad, financiamiento y baja tecnificación (Gaioli et al., 2009; CIEFAP, 2018; CFI, 2019). Esto lleva al incompleto manejo de los bosques, generando material que se acumula luego de los raleos y las podas, aumentando el riesgo de incendios en la época estival debido a la alta acumulación de biomasa y sequía (Defosse, 2015), así como también la presencia de insectos vectores de enfermedades y hongos de la madera (Gómez et al., 2015; Errasti, 2016).

En esta región, donde la densidad poblacional es baja, alcanzando valores de 6 hab/km²; las distancias significativas entre centros poblados, el clima frío y húmedo sobre todo en invierno; y la topografía montañosa, dificultan el tendido de los servicios básicos, donde la demanda energética para calefacción es muy elevada en todos los estratos sociales. En este sentido, el gas natural, el GLP, la leña y la electricidad son las fuentes más accesibles que permiten cubrir el requerimiento térmico. El hecho de que la red de gas natural alcance solo a parte de la población (cercana al 81 % según el CNPHYV, 2010), determina que el uso de la leña sea la principal fuente energética para generación térmica en hogares, sobre todo por su accesibilidad y hábito de utilización. Hoy la forma más generalizada de uso de la biomasa en hogares es la combustión directa de leña para la generación de calor a través de salamandras, estufas económicas u otras con mayor o menor eficiencia

de conversión. También existe demanda de leña desde el sector turístico (cabañas u hoteles), y – aunque en menor cantidad- también desde el sector comercial e industrial. En este sentido, las provincias patagónicas instrumentan el “Plan Calor”, que consiste en la transferencia de fondos a municipios y comisiones de fomento para destinar a la compra de leña, elementos e insumos para calefacción, donde el objetivo es mejorar las condiciones de habitabilidad de personas y familias (CIEFAP 2018; FAO, 2020b).

1.2. Antecedentes

La actividad forestal en la Patagonia andina data de muchos años, debido principalmente, al aprovechamiento de sus bosques nativos (Rothkugel, 1916; Jovanovski et al., 2003). Sin embargo la experiencia con las masas forestales implantadas en el ecotono es nueva y recién durante las últimas décadas se han realizado forestaciones de pinos, siendo pocas las que han llegado a su turno de corta.

Los ciclos de manejo forestal normalmente contemplan actividades de cuidado y mejoramiento de los bosques antes de su aprovechamiento. En el caso, tanto para el Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) como el Pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), el manejo se orienta a la producción de madera de calidad, lo cual incluye podas -como actividades frecuentes- ya que con ellas se obtiene madera libre de nudos, quedando las ramas como residuo de cada intervención. También son importantes los raleos, para obtener al momento de cosecha, trozas de buen porte para que puedan ser utilizados por la industria. Estos raleos originan residuos en formato de trozas que no son aptas para los aserraderos (principalmente por su escaso diámetro o por defectos de curvaturas y bifurcaciones), y también ramas provenientes de los individuos que no han sido podados y son extraídos en los raleos. En el caso de la corta final, los residuos originados son similares a los de los raleos. Por otro lado, los residuos de aserraderos son un importante componente de biomasa en regiones forestales; sin embargo, los factores que permiten la proyección de recursos futuros no están bien establecidos. Existen diferencias relativas a clases diamétricas de rollizos, tipos de especies y tecnología de aserrado utilizada.

Las referencias internacionales reconocen dos sistemas de trabajo principales en las operaciones de explotación forestal (Francescato et al., 2012), principalmente vinculados a los ecosistemas de la región escandinava:

- Sistema de troncos cortos -SWS (Short Wood System): el procesado se completa en el lugar de tala en el bosque y se transportan troncos comerciales.
- Sistema de árboles completos-FTS (Full Tree Systems): tras apeare el árbol, éste se transporta y el procesado se hace en el camino forestal o en el lugar de descarga.

En los bosques boreales de Canadá, debido al incremento económico potencial de residuos forestales a través de un método más adecuado de cosecha a menor costo, se está cambiando en la última década, el método tradicional de troncos cortos por el de árboles completos (Chen et al., 2017). Algunos de los métodos y

equipos pequeños y más sencillos para las operaciones relativas a las primeras claras y para el aprovechamiento de árboles de pequeña dimensión incluyen:

- Corta y astillado combinados, en el bosque mediante máquinas de tipo cosechadora y transporte de las astillas a la industria.
- Corta con motosierras o con cortadoras-apiladoras (feller-bunchers), astillando junto el tocón o en la vía de saca, y transporte de las astillas a la industria.
- Corta, transporte mediante tractores forestales de arrastre o tractores forestales autocargadores (forwarders) hasta la explanada, astillado con astilladoras pequeñas propulsadas por tractor o mayores, astilladoras móviles, y transporte de las astillas hasta la industria.

El astillado de los productos secundarios de aserraderos, tales como los costeros, se hace normalmente mediante astilladora de discos, frecuentemente con alimentación horizontal y rodillos propulsores.

En la región patagónica existen escasos registros referentes a la generación de biomasa residual en función a las prácticas silvícolas. Generalmente los datos hacen referencia a la generación de biomasa aprovechable para aserraderos. Sin embargo existen estudios donde el volumen de desechos se estimó como la diferencia entre el volumen total de corta y el volumen utilizable de los fustes a través de la simulación de raleos. Siendo entre 21 y 33,7 t/ha para pino oregón, de 5,7 a 98,2 t/ha para pino ponderosa y 25,4 a 30 t/ha para pino radiata (*Pinus radiata*), dependiendo de la edad e intensidad de intervención (Loguercio et. al, 2008; Loguercio et. al, 2011; Salvaré et. al, 2017; Gauto, 2017; Lederer et al, 2019).

En cuanto a los residuos de aserradero, la producción de residuos puede ser estimada por dos métodos, el primero utiliza la producción de madera aserrada y el factor de volumen de residuo de aserrado, mientras que la segunda usa el consumo total de rollizos y el factor de peso de residuos de aserrado. Residuos gruesos, finos y corteza representan aproximadamente 45%, 32% y 23% del total de residuos generados en aserraderos. El factor de volumen de residuo varía desde 41% hasta 50%, mientras que el factor de peso de residuos varía entre 0.50 y 0.55 t residuo/t rollizos (Yang y Jenkins, 2008).

Estos datos son orientativos para la región, y aún se requiere continuar generando información para conocer los volúmenes de material generado y realizar un aprovechamiento adecuado de la biomasa residual existente.

1.3. Objetivos del capítulo

El CEAT es una unidad del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) escenario de actividades de producción, investigación y extensión, dependiente de la Estación Experimental Agroforestal INTA ESQUEL (provincia de Chubut, Argentina). La misma, no escapa a la realidad previamente descripta, ya que sus masas boscosas implantadas y su aserradero generan anualmente altos volúmenes de residuos leñosos, que no son actualmente utilizados. Las necesidades de calefacción son cubiertas en su mayoría con leña proveniente de las masas boscosas nativas

(con el solo criterio técnico de aprovechar árboles muertos) así como también GLP, y en baja proporción material residual de la foresto-industria. Otra parte del residuo queda en la plantación, lo que implica un riesgo de incendios en la época estival además de ser foco de posibles enfermedades.

En este capítulo se resume un estudio de caso que genera información para promover el uso de biomasa en una escala real, brindando además valiosas herramientas metodológicas que pueden ser útiles y re-adaptables en casos semejantes. Nuestro objetivo fue la promoción del manejo adecuado de la biomasa residual de plantaciones generada a campo y en aserradero dentro del CET, para su utilización con fines térmicos, a fin de sustituir la biomasa tradicional desde bosques nativos y las fuentes fósiles utilizadas actualmente.

2. Estudio de caso

2.1. Características generales

La cobertura predominante de vegetación lo componen distintas estructuras de bosque de Ñire (*Nothofagus antártica* (G.Forst.) Oerst.), seguido de bosques altos de Coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.), Ciprés de la Cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Bizzarri) y Lengua (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser) en el bosque nativo en la categorías I y II del Ordenamiento Territorial (Figura 1). Mientras que en la categoría III predominan especies del género pinus, siendo la de mayor importancia la especie *Pinus ponderosa* ("Ponderosa"), seguida por *Pinus radiata* ("Radiata") y en menor medida *Pseudotsuga menziesii* ("Oregón"), *Pinus murrayana* ("Murrayana"), *Pinus sylvestris* ("Sylvestris"), *Picea* sp ("Picea"), y *Nothofagus alpina* ("Raulí").

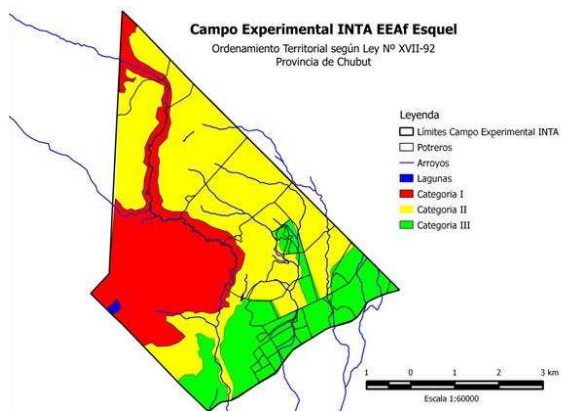


Figura 1. Distribución espacial de Categorías de Ordenamiento (Fuente: elaboración propia).

El predio del Campo Experimental de Trevelin (CET) del INTA cuenta con 325 ha de forestaciones, con edades que van desde un año hasta pasado los 50. Existen tres especies con mayor superficie implantada: Ponderosa (36%), seguido por Radiata (34%), Oregón (21%) y demás especies de menor importancia. Esta superficie genera anualmente un volumen de madera que es transformado en el aserradero. Las plantaciones están siendo manejadas desde el año 1991. Si bien existe un plan de manejo de las plantaciones, el mismo no pudo ejecutarse correctamente en la práctica por cuestiones económicas. En ningún caso, igualmente, los residuos generados tienen algún destino concreto ni han sido incluidos en algún esquema de manejo.

Se utiliza la leña principalmente para satisfacer las necesidades de calefacción en los distintos ambientes o edificios del CET. La energía es obtenida mediante la combustión con distintas tecnologías dependiendo del formato en que se encuentre la biomasa. Generalmente estos artefactos son de baja eficiencia. Se distinguen dos tipos de ambientes a calefaccionar. Ambientes con habitaciones (edificio comedor, edificio de oficinas, edificio vivienda), y ambientes sin habitaciones (galpones y talleres). En función de estos dos tipos de ambientes se puede determinar la tecnología recomendable para utilizar, siendo posible para los primeros el sistema de caldera, mientras que para los segundos estufas de alta eficiencia.

2.2. Métodos de abordaje

El estudio partió del reconocimiento de la necesidad de ordenar, en primer lugar, las masas forestales implantadas dentro del predio bajo estudio. Para la realización de una propuesta de manejo de los próximos 20 años de las plantaciones se tuvieron en cuenta tanto las existencias actuales como los esquemas de manejo propuestos para cada especie en la región (Davel et al., 2015). Estos esquemas se desarrollaron en función a la calidad de sitio, entendida como la capacidad que posee una superficie de terreno para sostener el crecimiento de los árboles. En la estimación de dicha calidad de sitio, se pueden emplear diferentes índices o métodos indirectos: i) en base a variables ambientales cuando no están presentes los árboles; ii) en base al índice de acículas cuando los árboles son jóvenes, y iii) en base al Índice de Sitio (IS) cuando los árboles tienen más de 25 años de edad. En este trabajo se empleó el IS ya que se contaba con registros de parcelas permanentes de masas maduras (50 años de edad) donde se determinaron las alturas dominantes y la edad total de la plantación y con ello el IS correspondiente para cada especie. Con toda esta información se obtuvo la superficie que debía ser afectada por cada tratamiento silvicultural (poda, raleo y corta final) para cada año a futuro. Mientras que para la estimación de las existencias, se realizó un muestreo forestal, con el mínimo número de parcelas necesarias por rodal, para lograr una estimación de la Biomasa Aérea Leñosa (BAL) con un error de 20% y una probabilidad de 90%. La estimación de la BAL se realizó mediante el método de ecuaciones alométricas (estimación indirecta), seleccionando ecuaciones específicas para cada una de las especies existentes en el predio de estudio. La BAL incluyó la biomasa de cada árbol en peso seco (tonelada) y su valor extrapolado a la unidad de superficie (hectárea), considerando solo la fracción sobre el suelo (no incluye las raíces).

Para cada tratamiento silvicultural propuesto, se realizó una estimación de la cantidad de residuos por unidad de superficie que podrían derivarse de la aplicación de dicho tratamiento. Para el caso particular de 3° poda en ponderosa, se realizó la medición a campo de los residuos generados por esta intervención, midiéndose la biomasa de las ramas extraídas en cada árbol podado, y luego, con la densidad de 350 arb/ha recomendado en los esquemas de manejo, la extrapolación a superficie. Para las demás prácticas silvícolas, se estimaron en gabinete. El trabajo en gabinete consistió en complementar distintas fuentes de información:

a) sistematización de datos existentes en literatura local o internacional sobre la generación de residuos;

b) consulta a expertos. Se realizaron dos entrevistas personales al Dr. Ing. Forestal Gabriel Loguerzio del Centro Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) autor de varios trabajos relacionados con la generación de residuos a campo de la actividad forestal;

c) estadísticas y registros internos de los aprovechamientos de estas masas. Esto fue posible para los rodales mayores de 30 años de edad, con datos disponibles en CET-INTA.

d) empleo del software calculEMUs (Letourneau, 2017) su versión básica puede ser descargada desde <http://sipan.inta.gob.ar/#Herramientas>. Este brinda, una vez definido los parámetros mínimos de diámetro y largo de los productos, la cantidad de unidades y el volumen que cada árbol cortado puede ofrecer, y con ello, por diferencia al volumen total, obtener el volumen residual.

Para el residuo proveniente de la cosecha del bosque, se determinó la fracción de volumen de residuo obtenido por cada unidad de volumen de rollos. Entonces, con el volumen anual de corta de rollos se obtuvo el volumen de residuo de este origen. Por otro lado, para la estimación de residuos de aserradero se analizaron los registros internos de procesamiento de los últimos 9 años y los rendimientos volumétricos del aserradero, estableciéndose la fracción residual obtenida.

La caracterización de la biomasa se realizó tomando 12 muestras en función de las 3 especies bajo estudio (ponderosa, radiata y oregón), y del tipo y formato de fracciones residuales considerando: ramas, despuntes del trozado, costaneros y aserrín. Estas muestras fueron llevadas a una fracción fina mediante corte con sierra circular para ser enviadas al laboratorio (LEMI 2019). Se realizaron las siguientes determinaciones:

☒ Humedad (%). Se utilizó una estufa marca ORL con circulación de aire forzado a 105°C hasta peso constante, siguiendo la norma ASTM D 5142-02 modificada.

☒ Poder calorífico superior (PCS [kJ/kg]). Se utilizó una bomba calorimétrica automatizada marca IKA, modelo C5000, parametrizada en operación adiabática según normas DIN 51900, ISO 19228, ASTM D240, ASTM D2015-96, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D5868 y ASTM E711.

☒ Análisis inmediato: Humedad (W %), Cenizas (CZ %), Volátiles (SV %), Carbón fijo (CF %). Se utilizó un equipo termogravimétrico marca LECO, modelo TGA 701, parametrizado con una curva de calibración ajustada para el tipo de biomasa. Según norma ASTM D 5142-02 modificada.

Se reportan valores medios obtenidos entre todos los formatos de biomasa estudiados. Para obtener el PCI se utilizó la expresión según la norma UNE 164001:

$$\text{PCIbh.} = [\text{PCSb.s.1.000 (1-Wb.h.)-11,27(Wb.h.100)-1.322}] / 1.000 \quad (\text{Ec. 1})$$

Se utilizaron los resultados de biomasa total disponible (Mb.s.) y el promedio del Poder Calorífico Inferior (E), considerando una humedad de recogida promedio del 30%.

Para el cálculo de la demanda energética se definieron los edificios existentes en el predio del CEAT que demandaran energía y el tipo de combustible utilizado. Se estimó la demanda anual térmica de cada edificio a través del consumo anual de leña y GLP según el caso:

- Para obtener el consumo de leña, se realizaron entrevistas semiestructuradas al personal encargado del suministro a los distintos sectores así como también a los usuarios de los edificios.
- En cuanto al GLP se analizaron los registros de compra de los últimos 5 años.

Las cantidades anuales consumidas de leña en m³ fueron calculadas en base al número de veces al día que es necesario acarrear la misma desde su lugar de acopio hasta el artefacto de combustión. Los medios de transporte utilizados (camioneta, carretillas y cajones de verdura) fueron cubicados, y junto con la aplicación de un factor de apilamiento, según el tipo de leña empleada, siendo de 0,8 para la leña partida con hacha (FAO 1980) y 0,7 para despunte de aserradero se obtuvo el consumo diario sólido en m³ en cada caso. Este valor fue multiplicado por la cantidad de días hábiles al año en el caso de las oficinas y galpones, y la cantidad de días totales al año en el caso de las viviendas.

También se registró el tipo de leña, refiriéndose a su formato así como también a la especie. El formato nos indica el grado de acondicionamiento necesario para su uso según el artefacto, y con ello una estimación del costo. Las especies fueron agrupadas en exóticas, haciendo referencia al género pinus principalmente, y nativas para Ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Endl) y Ñire (*Nothofagus antartica* (G. Forster) Oersted). Estas últimas provienen de ejemplares muertos y caídos en el bosque y son utilizadas principalmente en las viviendas.

Para estimar la demanda energética calórica anual en GJ, se multiplicaron las cantidades en volumen [m³] relevadas en los distintos sectores transformándolas en unidades de masa [kg]. Se utilizaron datos de densidad básica (Tabla 1), ya que la misma refleja la cantidad de madera seca correspondiente al considerar la razón entre el volumen verde y la masa anhidra de la madera. Para el caso de *Austrocedrus chilensis* se calculó la densidad básica en forma indirecta a través de la aplicación de una función de correlación ajustada por Núñez (2007) a los datos de densidad de madera seca reportados por INTI CITEMA (2003):

$$\text{Db} = 0,7022 \times \text{Ds} + 0,0678 \quad R^2 = 0,933 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde: Db= densidad básica (g/cm³) y Ds= densidad seca (g/cm³)

Tabla 1. Densidad básica (kg/m³) según especie.

Especie	Densidad básica	Autor
<i>Pinus ponderosa</i>	375	Jovanoski et al 2002
<i>Pseudotsuga Menziesii</i>	366	Jovanosky et al. 2005
<i>Pinus radiata</i>	395	Ariete Merino 2010
<i>Austrocedrus chilensis</i>	440	INTI CITEMA 2003
<i>Nothofagus antartica</i>	644	Solórzano 2017

Por último, para el cálculo de las emisiones de Gases Efecto Invernadero producto de la combustión del GLP utilizado para calefacción, se utilizó la metodología IPCC la cual divide el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono procedente de la combustión en 6 pasos:

- 1: Estimación del consumo aparente de combustible en unidades originales.
- 2: Conversión a una unidad común de energía.
- 3: Multiplicación por los factores de emisión para calcular el contenido de carbono.
- 4: Cálculo del carbono almacenado.
- 5: Corrección para dar cuenta del carbono no oxidado.
- 6: Conversión del carbono oxidado a emisiones de CO₂.

3. Resultados

En una vista general de la superficie ocupada por clases de edad de plantación, sin discriminar especies (Figura 2), se observa una mayor superficie ocupada por individuos de entre 25-30 años de edad (las que requieren raleos), seguida por aquellas de más de 50 años de edad (maderables) y en tercer lugar, de 15-25 años (las que requieren podas y raleos).

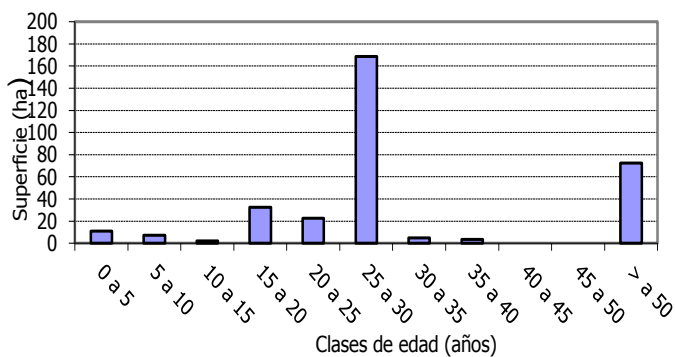


Figura 2. Superficie ocupada por clases de edad en el predio CET (Fuente: elaboración propia).

El plan de manejo propuesto contempla el esquema de aprovechamiento de las masas adultas por un lado, y los esquemas regionales de manejo para las masas jóvenes. El primero, aprovecha las masas mayores a 50 años, y el raleo comercial de masas menores a 30 años, hasta que estas últimas lleguen a la corta final con 40 años de edad. Se busca así mantener un abastecimiento de madera continuo hacia el aserradero. Mientras que para las segundas se orientan hacia la producción de madera de alta calidad, entendida como aquella libre de nudos con destino de aserrío o debobinado. Considerando una proyección de 20 años se determinaron las superficies afectadas a cada tratamiento así como también la tasa anual. (Tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos a realizar a las plantaciones según su edad proyectada.

Clase de edad Actual	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30		
Clase de edad final	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	>50		
Tratamiento								Superficie total ha	Tasa ha/año
1° Poda y Raleo a desecho (8-11 años)	X	X	X					21	1
2° Poda (10-13 años)	X	X	X					21	1
3° Poda (12-15 años)	X	X	X					21	1
1° Raleo Comercial (19-24 años)	X	X	X	X	X			75	3,8
2° Raleo Comercial (24-30 años)		X	X	X	X			64	3,2
3° Raleo Comercial Tardío						X		80	4
Corta Final (36-38 años)				X	X	X	X	121	6
Superficie por clase (ha)	11	7	2	32	23	169	81		

La biomasa aérea leñosa (cantidad de material en peso seco por unidad de superficie que se encuentra por encima del nivel del suelo), considerando la masa arbórea en pie, se muestra en la Tabla 3. Así como también la superficie anual sometida a cada intervención, y con esto la biomasa residual total disponible anualmente proveniente de las podas y raleos.

Luego de analizar los registros internos del sector de aprovechamiento forestal del establecimiento, sobre rodales maduros desde los años 1998 al 2018 se obtiene un valor promedio de **0,27 m³ de leña por metro cúbico de rollizo aprovechado**. Esta fracción corresponde a la porción de los fustes defectuosos así como también a ramas gruesas de la copa. Se puede considerar que es la disponible económicamen-

te luego del aprovechamiento. Tomando entonces, la tasa promedio de corta (rollizos) de los últimos 9 años en el predio, de 2.143 m³ por año, y considerando la fracción de leña obtenida por metro cúbico de rollos (según análisis anterior), obtenemos un valor de 578.6 m³ anuales de leña. Lo que multiplicado por la densidad básica media de la madera promedio para las especies de 0,38 t_{ms}/m³ (Jovanoski et al, 2002; Jovanoski et al, 2005; Ariete Merino 2010) obtenemos **219,9 t_{ms}/año de residuos** que podrían ser aprovechados energéticamente.

Tabla 3. Residuos anuales provenientes de tratamientos silviculturales (biomasa residual). Expresadas en todos los casos como peso seco.

	Pino Ponderosa		Pino Radiata		Pino Oregón		Biomasa residual total
Biomasa Aérea Leñosa [t/ha]	83 (±25) 26 años. 670 pl/ha		181 (±73) 28 años. 400 pl/ha		174 (±33) 23 años. 800 pl/ha		
Tratamiento	t/ha	ha/año	t/ha	ha/año	t/ha	ha/año	t/ha
1° Poda y Raleo a desecho (8-11 años)	9,5			0,2		0,3	4,8
2° Poda (10-13 años)	4,8			0,2		0,4	2,9
3° Poda (12-15 años)	5,3			0,2		0,4	3,2
1° Raleo Comercial (19-24 años)	5,5	1,3		0,2	9,4	1,8	25,5
2° Raleo Comercial (24-30 años)	8,2	1,3		0,2	14,2	1,8	38,5
Raleo Comercial Tardío	10	2	15	1,9	28		48,5
						Total	123,4

Registros de procesamiento en aserradero, para el mismo período antes descripto, arroja un valor de rendimiento promedio del orden del 48% (FAO 2017). Este valor nos indica que por metro cúbico de rollizos que ingresan al aserradero, se obtienen 0,48 m³ de productos (tirantes, tablas y clavadores) y 0,52 m³ de residuos. Ahora bien, de estos residuos, el 10 % corresponde a aserrín, valor que se encuentra entre los presentados por Koch (1988) y Williston (1978) para materia prima de características similares. Esto es, por cada metro cúbico de rollos que entra al aserradero, se producen 0,42 m³ de residuos sólidos (costaneros) y 0,10 m³ de aserrín. Si al volumen de residuos sólidos lo multiplicamos por la densidad básica promedio para la tres especies de 0,38 t_{ms}/m³ obtenemos 0,16 toneladas de residuo seco por m³ de rollizo procesado. Si consideramos que en el período mencionado anteriormente se procesaron en forma promedio 2.143 m³ en el año, resultan que se generan **342.2 t_{ms}/año de residuos sólidos de aserradero** que podrían ser aprovechados energéticamente.

En síntesis, en forma anual se generan 643,4 t_{ms}/año de residuos provenientes de la cosecha del bosque y su industrialización (aserradero). Si se realizan a futuro las podas y raleos propuestos, se adicionarían 123,4 t_{ms}/año, proyectándose una generación de **766,4 t_{ms}/año** que podrían ser aprovechadas.

Por otro lado, la Tabla 4 muestra la caracterización físico-química de las fracciones residuales estudiadas (ramas de la poda, costaneros y aserrín del aserradero, y despuntes de raleo de las distintas especies).

Tabla 4. Caracterización de biomasa

Muestra	n	W %	CZbs %	SVbs %	CFbs %	PCSbs kJ/kg
Pino oregón						
Promedio	16	34,97	0,44	78,975	20,59	20.079
Desvío estándar		10,66	0,19	1,09	0,96	346
Pino ponderosa						
Promedio	16	47,41	0,38	80,08	19,85	19.327
Desvío estándar		21,71	0,11	0,87	0,82	303
Pino radiata						
Promedio	16	35,70	0,37	80,68	18,96	19.516
Desvío estándar		14,51	0,19	0,87	1,27	786

Donde: W_{bh} [%]: contenido de humedad en la muestra en base húmeda. CZ_{bs} [%]: contenido de cenizas en la muestra en base seca. SV_{bs} [%]: contenido de sólidos volátiles en la muestra en base seca. CF_{bs} [%]: contenido de carbono fijo en la muestra en base seca. PCS_{bs} : poder calorífico superior de la muestra analizada. n = cantidad de repeticiones en laboratorio.

Considerando el PCS_{bs} promedio de la caracterización anterior de 19,64 GJ/t, y un 30 % de humedad, obtenemos el Poder Calorífico Inferior en base húmeda (PCI_{bh}) según la ecuación 1. De esta manera podemos calcular junto con la masa proveniente de cada fuente, la oferta energética en forma discriminada (Tabla 5).

Tabla 5. Oferta Energética según fuentes de biomasa.

Fuente de Biomasa	Residuo t _{ms} /año	PCI_{bh} GJ/t	Oferta energética anual GJ
Cosecha del bosque	220	13,75	3.025
Aserradero	424	13,75	5.830
Raleos y podas	123	13,75	1.691,25
Total	767		10.546,25

Por otro lado, la demanda de energía en el CET está dada por 32 personas que trabajan en diferentes sectores dado la complejidad de actividades que se desarrollan en el mismo, ya que es escenario de actividades de investigación, producción y extensión. Los edificios (oficinas, talleres, galpones y viviendas) son calefaccionados

en su mayoría con leña, siendo utilizado el Gas Licuado de Petróleo (GLP) solamente en la oficina técnica-comercial y en el salón de reuniones. El horario de funcionamiento administrativo es de 8 a 16 horas, por lo que el resto del tiempo permanece sin calefaccionar, quedando solo las viviendas en uso.

La demanda anual de leña y GLP de cada uno de los sectores mencionados, se muestran en la Tabla 6. Asimismo la demanda energética anual considerando valores de PCI_{bn} con un 30 % de humedad y densidad básica de la madera de 0,38 t/m³.

Tabla 6. Consumo anual de leña y GLP para calefacción y su equivalencia energética. La leña anual estimada proviene del mismo predio.

Sector	Leña anual m ³ sólidos]	Leña Anual t _{ms}	GLP anual kg	Demanda Energé- tica anual GJ
Vivero	42,6	16,13 ^A	-	221
Taller General	17,4	7,23 ^{BC}	-	192
Comedor, Baños y habitación de huéspedes	18,9	7,87 ^{BC}	-	100
Aserradero y afilado	38,3	14,51 ^A	-	198
Oficina técnica-comercial + salón de reuniones y quincho	39,6	16,49 ^{BC}	1171	327
Puesto ovinos	32,9	19,54 ^B	-	236
Laboratorio ovinos	-	-	135	6
Puesto de vacunos	31,8	19,94 ^C	-	228
Vivienda Jefatura	56,4	21,35 ^B	-	292
Vivienda de huéspedes	32,3	12,25 ^B	-	168
Total	310,3	153,9	1306	1.868

Donde: A= el origen de la biomasa es aserradero, B= el origen de la biomasa es bosque implantado y C= el origen de la biomasa es bosque nativo.

En cuanto al formato utilizado, el “despunte” de aserradero (el cual refiere al trozo remanente luego de establecer la medida de longitud deseada de la pieza en el aserrado, así como también la eliminación de defectos) es el menos utilizado. Mientras que la leña “partida” con hacha hasta llegar a la medida máxima de 15 cm de diámetro es el formato más utilizado (casi tres veces más que los despuntes) debido a que se encuentra con menor contenido de humedad (Figura 3).

Con los datos de los tiempos insumidos para el acondicionamiento, se pudo calcular un rendimiento de 0,55 m³/jornal promedio. Por lo que al año se utilizan 264 jornales.

Por lo tanto, la cobertura energética del predio sería resuelta en su totalidad ya que la demanda es casi cinco veces menor que la oferta. Esto implica un excedente de

8.671 GJ o lo que es lo mismo 631 t o 1659 m³ anuales que podrían ser acondicionados para la venta u otro uso.



Figura 3. Despunte de tirantes (a), despunte de tablas (b) y partida (c). (Fuente: propia, 2020, CEAT, INTA)

4. Conclusiones del estudio

En base a las estimaciones realizadas, el potencial energético con que se cuenta anualmente a partir de la biomasa disponible (a campo y de aserradero) quintuplica la demanda térmica anual estimada para el CEAT INTA, con lo cual se podría cubrir la demanda de nuevos sectores con la biomasa disponible, y/o acondicionarla para su venta. La decisión de cuál fuente de biomasa utilizar, debe considerar la necesidad de aplicar algún pre- tratamiento previo a su utilización y analizar la logística a emplear en cada caso:

- ☐ *para la biomasa proveniente del aserradero* es necesario aplicar secado, chi-peado y peletizado, y se parte de la ventaja de que la biomasa utilizable se encuentra concentrada (no implica muchos costos de logística para su recolección).
- ☐ *para la biomasa generada a campo*, proveniente de la cosecha del bosque (fuente de uso actual), se requiere el secado y el partido del material, donde la dedicación horaria para el pre-tratamiento, es decir, partir los trozos con hacha es alta (estimado en 264 jornales al año).
- ☐ *para los residuos provenientes de la poda y los raleos*, también generados a campo, son necesarios el secado y el chi-peado, para facilitar su utilización. Asimismo, la alta dispersión con la que se encuentra, implica una mayor complicación logística por encontrarse en forma dispersa en el bosque, y altos costos que deben ser particularmente estimados en cada caso.

Si bien existe un excedente de la oferta de biomasa en relación a la demanda estimada, la posibilidad de comercialización depende del desarrollo de tecnología asociada a la generación de calor por combustión con biomasa moderna, ya que se requiere una transformación en formato chip o pellet de algunas de las fuentes analizadas. La transformación a pellet sería conveniente para el aserrín del aserradero. La transformación a chip es para llevar a un formato homogéneo y fácil de realizar, tanto de los raleos (ramas y trozos de pequeño diámetro y formas irregulares) como los sólidos del aserradero.

Tabla 7. CO₂ Procedente de la Quema de Combustibles. Cálculos paso a paso.

	Industria de Energía		GLP
PASO 1	A	Consumo Gg	1,2X10 ⁻³
PASO 2	B	Factor de Conversión ¹ TJ/Gg	47,31
	C	Consumo TJ C=AxB	0,0568
PASO 3	D	Factor de emisión de carbono ² t C/TJ	17,2
	E	Contenido de carbono t C E= CxD	0,976
	F	Contenido de Carbono [Gg C] F=Ex10 ⁻³	9,76X10 ⁻⁴
PASO 4	G	Fracción del carbono almacenado ³	0,80
	H	Carbono almacenado Gg C H=FxG	7,81X10 ⁻⁴
	I	Emisiones netas de carbono Gg C I=F-H	1,95X10 ⁻⁴
PASO 5	J	Fracción del carbono oxidado	1
	K	Emisiones reales de carbono Gg C] K=IxJ	1,95X10 ⁻⁴
PASO 6	L	Emisiones reales de CO ₂ Gg CO ₂ L=Kx(44/12)	7,15x10 ⁻⁴
	M	Emisiones reales de CO ₂ t CO ₂ M=L*1000	0,715

¹Valor de Tabla 1-3 IPCC 1996

²Valor de Tabla 1-2 IPCC 1996

³Valor de Tabla 1-4 IPCC 1996

Por otro lado, deben destacarse los beneficios ambientales que podrían lograrse por la utilización de los residuos, como la disminución del riesgo de incendios y enfermedades, y la reducción de las emisiones de CO₂ por la quema de fósiles para la calefacción de ambientes. En efecto, la acumulación de residuos en los bosques, aumentan el riesgo de incendios, con la consecuente pérdida del ecosistema. En la Patagonia, entre 1999 y 2005 se quemaron más de 2.7 millones de hectáreas de bosques y pastizales (Torres Curth et.al, 2008); liberando GEI y otros contaminantes (Defossé, 2011), más allá de la pérdida de biodiversidad. Con respecto a la disminución de los riesgos de plagas y enfermedades, se ha observado, por ejemplo, un aumento poblacional de los escarabajos de corteza en estos residuos, siendo dichas especies vectores de hongos que afectan a la madera (Errasti, 2016), y otras especies que directamente generan la muerte de las plantas en pie como es el caso de *Pissodes castaneu* (Gomez et. al, 2015). En términos de reducción de GEI,

la sustitución de la quema de fósiles (GLP) para la calefacción por la combustión de biomasa contribuiría a una merma de 0.715 t CO₂eq de emisiones en el caso de estudio (Tabla 7). En este sentido, resulta necesario un esfuerzo mayor en la evaluación del ciclo de vida de las cadenas de bioenergía y las propuestas de manejo realizadas, a fin de conocer si el balance de emisiones resulta en efecto neutro o aún hay aspectos que deben ser optimizados.

5. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

Los resultados logrados son alentadores. Se ha estudiado la posibilidad de lograr múltiples beneficios a partir de una planificación integral de las forestaciones existentes en el CEAT. Esto aun sin dejar de considerar que la oferta de materia prima está dispersa en algunos casos, y su generación en general es de baja escala. Por tanto, la propuesta realizada es viable en la medida en que se trata de un Centro de Experimentación donde ya se realizan actividades diversas, y donde el manejo de la biomasa residual, solo implicaría optimizar el sistema con múltiples beneficios, que no necesariamente implica un uso energético maximizado, sino que sería ventajoso en un esquema integral de manejo y pionero frente a otros Centros Experimentales similares en la región.

Entre los principales aportes logrados en este trabajo, pueden destacarse los siguientes aspectos:

☑ Mediante un procedimiento sencillo, basado en consulta a expertos, uso de reportes previos y relevamiento de datos de fácil obtención a campo (diámetros, alturas), se ha definido una **propuesta de manejo de plantaciones** con base en información técnica calificada. De allí fue posible estimar, mediante ecuaciones alométricas disponibles y software gratuito, la potencial generación de residuos del manejo silvicultural del bosque implantado.

☑ Se ha logrado construir **una base de datos** sobre características físico-química de las principales especies y formatos disponibles de biomasa forestal derivada de plantaciones de la Patagonia argentina. Esta información resulta fundamental para poder conocer la potencial respuesta de la biomasa en las tecnologías de conversión energética y si requiere su adecuación previa.

☑ Se ha generado información valiosa sobre **coeficientes de generación de residuos/productos**, tanto en etapa de cosecha como de primera transformación de la madera. Se ha logrado la cuantificación precisa de la fuente mayoritaria de generación de biomasa residual forestal (aserradero), gracias a la existencia local de índices de residuo/producto de la industria, que fueron recopilados.

☑ Asimismo, se ha logrado la cuantificación de la **demanda energética calórica** real del predio del CEAT y se ha precisado la logística empleada, lo que puede dar lugar a definir puntos concretos de optimización.

☑ De manera integral, se ha evaluado el sistema de gestión actual y la propuesta que se realiza en el presente podría ser parte del mismo, sin afectar mayormente los esquemas de trabajo ya existentes, pero con un notable beneficio múltiple energético, ambiental y aún económico, en la reducción del uso de combustibles fósiles. Este último estudio se realizará de manera particular para corroborar la viabilidad económica de la propuesta.

Entre las fortalezas de la propuesta de gestión pueden mencionarse:

- ☒ Potenciales beneficios ambientales debido a la reducción del riesgo de incendios, proliferación de enfermedades y reducción de emisiones de GEI.
- ☒ Potencial beneficio social al generar una alternativa para los hogares que se calefaccionan con leña, mediante la incorporación de artefactos de combustión de chip o pellets. Esto es, que el residuo, al ser tratado y acondicionado, puede ser utilizado en lugar de la calefacción a leña, ya que el chip o el pellet tienen la ventaja de poder ser utilizados en sistemas de alimentación automática, frente a la alimentación manual de la leña. Pero para esto hace falta un desarrollo tecnológico de los artefactos de combustión.
- ☒ Disminución de la presión sobre el bosque nativo.
- ☒ Alentar el manejo integral y planificado de las plantaciones.
- ☒ Existencia de prestadores de servicios con chipeadoras medianas y pequeñas. Esto puede dar lugar asimismo, a sinergias en pequeñas cooperativas o asociaciones locales, que pongan en marcha alternativas de micro gestión o pequeños emprendimientos que movilicen las economías locales.

Entre las principales dificultades para llevar adelante en otros predios forestales una propuesta de gestión similar a la presentada en este estudio, se reconocen:

- ☒ Escasos datos regionales de residuos generados a campo por actividades silviculturales.
- ☒ Escasos estudios regionales de valorización energética de residuos forestoindustriales.
- ☒ Escasos trabajos regionales de la actividad forestal sobre Huella de Carbono y análisis de ciclo de vida que permitan conocer la efectiva reducción de emisiones que podría lograrse con el uso de la biomasa residual.

En términos generales, la actividad forestal planificada, que pretende mantener el recurso a perpetuidad aprovechándolo por debajo de la tasa de generación, genera residuos que pueden ser utilizados. Más allá de las estimaciones realizadas para una gestión completa de estos residuos y su uso energético y ambiental complementario, resulta necesario generar información específica sobre otros aspectos asociados a un uso sustentable de las plantaciones pero también de los bosques nativos. Entre ellos, aspectos como el balance de nutrientes requeridos en cada tipo de suelo, o el uso y consumo de agua, o las prácticas de menor impacto en el manejo de los bosques, deberían ser estudiados de forma complementaria, ya que son pocos los trabajos locales que hacen referencia a estos temas.

Los artefactos nacionales de combustión de biomasa para calefacción domiciliaria, utilizan la leña como principal combustible, siendo escasas las experiencias con biomasa moderna (pellet, chip). Entonces el uso del recurso en estos formatos, requiere un desarrollo de la tecnología nacional. Según un relevamiento preliminar existen en el país 9 productores nacionales de calderas de diferentes tipos a nivel industrial (acuó y pirotubulares, calentadores de aceite, cámaras torsionales), y solo 7 fabricantes locales de estufas y salamandras a leña y quemadores de pellets para hogares y estufas.

Los equipos de energía térmica utilizados en la industria o agroindustria generalmente consumen chips. Estos tienen posibilidad de fabricarse localmente, mientras que los equipos de uso residencial y comercial generalmente emplean pellets. Estos equipos en su mayoría son importados, registrándose avances en la producción nacional especialmente de estufas (Ej. OFEN). A pesar de ser un combustible más costoso, las ventajas del pellets son notables en relación a los chips: eficiencia en transporte, poder calorífico constante, producto estandarizado, etc (MAYDS, 2021). En este sentido, se cuenta con una normativa internacional y la norma IRAM n° 17225 en desarrollo, para la estandarización con norma nacional de oferta de bio-combustibles sólidos biomásicos en proceso, con lo cual se avanzará en la regulación de la logística de aprovisionamiento y estandarización de costos que probablemente fortalecerá el desarrollo de tecnología nacional para uso de biomasa en formatos densificados o chips.

Agradecimientos

A los Ing. Forestales, Gabriel Loguercio y Federico Letourneau por su colaboración desinteresada.

Referencias

- Ariete Merino N., (2010). Caracterización de madera de *Pinus radiata* D. Don sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión. Universidad austral de Chile. Facultad de ciencias forestales y recursos naturales.
- CAMMESA (2021). Energías Renovables. Base de datos 2021. <https://cammesaweb.cammesa.com/erenovables/>
- Chen S., Shahi C., Chen H., McLaren B. (2017). Economic analysis of forest management alternatives: Compositional objectives, rotation ages, and harvest methods in boreal forests. *Forest Policy and Economics* 85.124–134
- CFI (2019). Plan de aprovechamiento de residuos dendroenergéticos Chubut.
- CIEFAP (2018). Compilación integral de datos, bajo metodología WISDOM, en la región de la comarca andina ampliada.
- Davel M., Caballé G., Gonda H., Chauchard L., Sbrancia R., Bulgarelli L. (2015). Los tratamientos silvícolas. Manual de Buenas Prácticas para el manejo de plantaciones forestales en el noroeste de la Patagonia. Cap.9 p: 191-243.
- Defossé G., Loguercio G., Oddi F., Molina J., Kraus D. (2011). Potential CO₂ emissions mitigation through forest prescribed burning: A case study in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management* Vol.261 p. 2243-2254.
- Defossé G., (2015). ¿Conviene seguir fomentando las plantaciones forestales en el norte de la Patagonia? *Ecología Austral* 25:93-100. Asociación Argentina de ecología.
- Errasti A. (2016). Hongos manchadores de albura en especies forestales exóticas y nativas de los Andes Patagónicos: taxonomía, patogenicidad y manejo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- FAO a (2020). Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>

-
- FAO b (2020). Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa – Metodología WISDOM - Provincia del Chubut. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/cb0716es>
- FAO (2017). "Proyecto District Heating" Paraje Los Cipreses, Municipio de Trevelin, Chubut, Argentina. Informe técnico.
- Francescato V., Antonini E., Zuccoli Bergomi L. (2012) Manual de combustibles de madera. Producción. Requisitos de calidad. Comercialización. Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa.
- Gaioli F., León E., Cafici M., Casavelos J. (2009). Propuesta de un Marco Institucional para facilitar la Aplicación de Tecnologías y Desarrollo de Proyectos para el Uso Efectivo de los Residuos Forestales.
- Gauto Acosta M., (2017). " Proyecto District Heating " Paraje Los Cipreses, Municipio de Trevelin, Chubut, Argentina. Informe técnico preparado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Pro biomasa UTF/ARG/020/ARG.
- Gomez C., Askenazi, J.; Williams, R.; Freeman, G.; Concha, M. (2015). Forest debris as a breeding site for *Pissodes castaneus*: a risk for standing trees? IUFRO 07.03.05 – 07.03.12 Joint Meeting.Pg.71
- IEA a (2019). Renewable information: Overview. International Energy Agency. http://wds.iea.org/wds/pdf/ren_documentation.pdf
- IEA b (2019). Energy efficiency indicator: highlights. International Energy Agency. <https://www.iea.org/statistics/efficiency>
- IEA c (2018). Renewable 2018: Analysis and Forecasts to 2023. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2018>
- INTI CITEMA (2003). Densidad de las maderas. https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds).
- Jovanovski A., Jaramillo M., Loguercio G., Antequera S., (2002). Densidad de la madera de *Pinus ponderosa* (Dougl. Ex Laws) en tres localidades de Argentina. Bosque, Vol. 23 N° 2, pp. 57-67
- Jovanovski A., Manfredi R., Villena P., (2003). Evaluación de alternativas para aumentar la competitividad de la industria forestal de procesamiento primario en la provincia de Tierra del Fuego. Consejo Federal de Inversiones. Tierra del Fuego. Argentina.
- Koch P. (1988). Utilization of hardwoods growing on southern pine sites Vol. II. Agriculture Handbook N° 605. U. S. Department of Agriculture. Forest Service.
- Lederer N., Defosse G., (2019). Gestión sustentable de residuos de forestaciones en un gradiente ambiental de Patagonia: efectos de diferentes técnicas sobre el balance de emisiones de CO₂, la tasa de descomposición de residuos y la dinámica de nutrientes. Informe de Avance de Doctorado en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- Letourneau F., (2017) CAI, Congreso Argentino de AgroInformática. Módulo de Simulación de Trozado de Árboles del Software "calculEMUs" 46JAIIO - CAI - ISSN: 2525-0949 - Página 265-276.
-

-
- Loguercio G., Jovanovski A., Molina J., Pantaenius P. (2008). Residuos de biomasa de forestaciones y aserraderos de la región andina de las provincias de Neuquén y Chubut. Evaluación preliminar de oferta.
- Loguercio G., Gonda H., Molina J. (2011). Estimación de la biomasa residual producto de raleos pre comerciales y podas. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (MAyDS) 2021. Plan Estratégico Forestal Y Foresto Industrial Argentina 2030. Consulta en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/04/plan_estrategico_foresto_industrial_2030.pdf
- Ministerio de Energía. Balance Energético Nacional 2018. www.argentina.gob.ar/energia/hidrocarburos/balances-energeticos.
- Núñez C.E (2007). Relaciones de Conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Rev. Cienc. Tecnol. 9 (9): 44-50.
- Rothkugel M., (1916). Los Bosques Patagónicos. Oficina de Bosques y Yerbales. Talleres Gráficos del Ministerio de Agricultura de la Nación, Argentina.
- Salvaré F., Andreassi L.G., Diez J.P., Claps L., (2017) "Ensayo de Poda y Raleo para Producción y Caracterización de Chips con Fines Energéticos. Arroyo del Medio, Bariloche".
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_revista_presencia_ndeg_68.pdf
- Torres Curth M., Ghermandi L., Pfister G. (2008). Los incendios en el noroeste de la Patagonia: su relación con las condiciones meteorológicas y la presión antrópica a lo largo de 20 años. Ecología Austral.
- Williston E. M. (1976). Lumber Manufacturing: The Design and Operation of Sawmills and Planer Mills. Miller Freeman Publications, Inc.
- Yang P., Jenkins B.M. (2008). Wood residues from sawmills in California. Biomass and Bioenergy 32 101– 108.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso III, 2021: 57-68
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO III. Potencial energético de la biomasa residual pecuaria en el campus de la UNALM, Perú

Isabel Ana María Iman Torres¹, Mary Flor Césare Coral^{3*}, Alejandrina Sotelo Méndez², Henry García Bustamante

¹ *Facultad de Zootecnia. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 12, Perú.*

² *Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 12, Perú.*

³ *Facultad de Ingeniería Mecánica. Pontificia Universidad Católica del Perú. Av. Universitaria 1801, San Miguel (Perú)*

Resumen. El estudio se realizó dentro del campus universitario de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), dado que esta por su naturaleza se caracteriza por generar grandes volúmenes de residuos de sus centros de producción pecuaria. El objetivo fue determinar el potencial de uso energético de esta biomasa para abastecer en un porcentaje la demanda energética de la Universidad, de manera eficiente. Se obtuvo como resultados una producción promedio de 7397 kg/día de residuos pecuarios de aves, vacunos, ovinos, porcinos, equinos y animales menores en un periodo de 10 años, los cuales al ser convertidos en biogás tienen un potencial energético de 745 Mwh/año. Este potencial energético representa el 17.35% del consumo energético que tuvo la UNALM en el año 2018, el cual equivale a 311891.28 soles peruanos. Por lo tanto, la biometanización de los residuos biodegradables del campus UNALM podría convertirse en una alternativa eficaz en la gestión tradicional de estos residuos, capaz de generar energía renovable como el biogás; valorizándolo de este modo y con ende dar cumplimiento a la última modificatoria de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (D.S.1501).

* Correspondencia: Mary Flor Césare C. E-mail: mcesare@lamolina.edu.pe

Introducción

Las energías renovables, dentro de ellas la bioenergía, desempeñan un papel muy importante al ser una alternativa fiable y competitiva para el reemplazo del petróleo y sus derivados, puesto que son una fuente autóctona que reduce la dependencia energética, además de promover el desarrollo local y el cuidado del medio ambiente. La importancia de la biomasa como fuente de energía en la actualidad no admite discusión, la presente política energética del Perú busca reducir el uso de fuentes energéticas provenientes de los hidrocarburos, dada su alta inestabilidad en los precios y sus altos índices de contaminación; y, a su vez, incorporar fuentes renovables de energía. Desde el punto de vista social y económico, el uso de la biomasa contribuye a la diversificación energética, a la reducción de la dependencia de fuentes externas de energía, en cuanto permite la producción de energía a partir de recursos autóctonos y renovables.

El aprovechamiento de la biomasa residual, mediante la utilización de procesos termoquímicos ofrece ventajas económicas y ambientales, importantes para el entorno rural, la generación de riqueza y empleo, relacionadas directamente con el aumento del desarrollo industrial y económico de la localidad en donde se encuentre este, sin embargo las investigaciones existentes sobre su utilización a través de procesos bioquímicos son principalmente para la industria de un proceso productivo industrial particular y no a nivel macro sobre el potencial real que existe en una localidad. Resulta evidente entonces la importancia de la biomasa como recurso generador de energía, pues se producen grandes cantidades de subproductos de biomasa derivadas del uso y mantenimiento de las actividades humanas. Ahora, el aprovechamiento de los subproductos con escaso o nulo valor económico (residuos) depende fuertemente de la facilidad de recolección, por lo cual el análisis de su dispersión es de significativa importancia para valorar su uso. Por ello, el aprovechamiento de la biomasa residual es de interés tanto para los trabajadores, como para la Universidad. En el marco del compromiso de Ecoeficiencia suscrito por la UNALM desde el 2017 a la iniciativa EcoIP del Ministerio del Ambiente (MINAM) y los objetivos de Sostenibilidad ambiental, es importante tener en cuenta los múltiples usos técnicos de la biomasa como fuente de energía, ya sea biomasa para producción de calor, o biodigestores para la producción de biocombustibles.

Los múltiples beneficios del aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos exigen una evaluación cuidadosa debido a la enorme variedad de recursos que se incluyen dentro del término "biomasa". Las características particulares de cada uno de ellos, las condiciones locales de donde se encuentran, y las muy variadas tecnologías de aprovechamiento de los mismos, hacen que el punto de partida para desarrollar un sistema de gestión de la biomasa que permita analizar la viabilidad de su aprovechamiento se centre en evaluar las cantidades y calidades de biomasa con las que se pretende realizar las futuras investigaciones.

El objetivo general del presente trabajo es determinar el potencial energético de la biomasa residual pecuaria del campus universitario de la UNALM y con ello poder abastecer parcialmente la demanda energética del campus, de manera eficiente. En ese sentido, los objetivos parciales del presente estudio son: 1) estimar la cantidad de biomasa residual pecuaria, por áreas generadoras, en kilogramos de residuos produci-

dos por año, 2) realizar la caracterización de la biomasa residual pecuaria de cada área, en base a tres repeticiones y finalmente 3) determinar el potencial energético por especie animal y total, así como el consumo energético de la UNALM.

1. Materiales y Métodos

1.1. Sitio de estudio

El desarrollo de la investigación se realizó recolectando los residuos pecuarios (gallinaza, bovinos, cerdos, caprinos) de la granja de animales menores ubicado dentro del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, siendo el periodo de estudio el año 2018. La generación de estiércol está directamente relacionada con el número de animales que se encuentran en las diferentes áreas del campus, por lo tanto, para estimar la generación de biomasa residual pecuaria en la UNALM, primero se obtuvo los registros anuales sobre el número de animales existentes en la UNALM, proporcionados por la Oficina de Patrimonio de la de la misma. Por otro lado, los datos sobre generación de excretas por individuo según especie, fueron tomados de investigaciones realizadas en la UNALM, de la revisión bibliográfica sobre generación de excretas de distintas especies y los valores encontrados in situ a través de entrevistas tanto a alumnos encargados de la limpieza del área, así como al jefe del área.

1.2. Muestreo y caracterización de la biomasa residual pecuaria

☐ Preparación de las muestras para la caracterización

El muestreo consistió en realizar un recorrido en zig-zag, desde un punto de entrada, hasta la esquina extrema, tomando en cada punto una submuestra, se realizó este procedimiento en todos los corrales o galpones de las distintas áreas. Para obtener una muestra representativa del área se realizó el método del cuarteo Binner et al. (2015), el cual consiste en depositar sobre una manta las submuestras homogenizadas, las cuales se van cuarteando en forma de X, seleccionando 2 secciones opuestas que nuevamente son mezcladas y cuarteadas, hasta dejar una cantidad equivalente a 100g que corresponderá a la muestra compuesta, la cual se trituro y tamizo con un tamaño de poro de 20 mm. Ver fig.1.

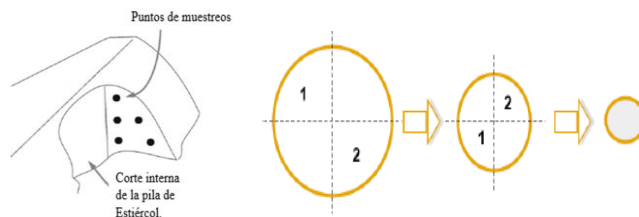


Figura 1. Toma de muestra por el método del cuarteo. Fuente: Elaborado a partir de CEPIS (1983) y Austrian Standard OE-NORM EN 14899.

2 Acondicionamiento de la muestra

La biomasa fue secada en estufa a 105°C por 24 horas aproximadamente y puesta a enfriar en un desecador de vidrio y triturada, se realizaron 3 repeticiones para cada análisis indicado en este estudio (Figura 2).



Figura 2. Acondicionado de la muestra mediante el tamizado. Fuente: Cesare et al., 2017, Perú).

2 Caracterización de las muestras

El estudio de caracterización de las muestras se realizó en los laboratorios de Energías Renovables del Dpto. de Ingeniería Agrícola y en Calidad Total Laboratorios, pertenecientes a la UNALM. La caracterización química de la calidad de las muestras de biomasa fue realizada utilizando los siguientes métodos:

- Análisis químico elemental (C, H, O, N) se siguió la metodología propuesta (ASTM D 5373 - 16) en el manual del equipo Instrument CHN628. Se requiere que la muestra este previamente acondicionada (seca y molida).
- Análisis termogravimétrico – TGA Proximal: El análisis proximal (% H, %MV, %Ceniza) se siguió la metodología ASTM D7582 - 15, establecido en el manual del equipo TGA Q600; este análisis se realizó en base húmeda, muestra sin tratamiento previo, usándose una termobalanza TA INSTRUMENT TGA Q600.
- Análisis de poder calórico – TGA (Calorímetro): se realizó usando 0.4 g de masa de muestra sólida en base seca, se llevó a cabo con una combustión en atmósfera de oxígeno seco. El cálculo del poder calórico se realizó de acuerdo con la norma ASTM D5865 - 07, la cual es indicada en el manual del equipo LECO AC600.
- Análisis físico químico: se analizaron las siguientes características fisicoquímicas: pH, conductividad, densidad. Para determinar el pH y conductividad eléctrica, se extrajo un volumen de 30 ml de sustrato y se agitó durante una hora con seis veces su volumen de agua y se midió en suspensión no filtrada (Ouahid & Afilal, 2017). Para determinar la densidad se pesó la muestra y se dividió entre el volumen ocupado por este como lo indican

(De Lucas y Del Peso, 2012). Para conocer el contenido de materia orgánica se calcinó la muestra durante seis horas a 500-550°C, tal y como lo indican los protocolos descritos por el Standard methods for the examination of water and wastewater ([APHA], 1998).

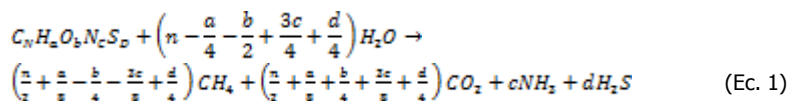
1.3. Estimación del potencial energético de la biomasa residual en el sector pecuario

La biomasa residual pecuaria posee un alto contenido de humedad, para el La biomasa residual pecuaria posee un alto contenido de humedad, por ello, para el aprovechamiento energético de una biomasa mediante gasificación, es indispensable que el residuo tenga una humedad menor al 50% para que las bacterias anaeróbicas presentes proporcionen buenos rendimientos indican (De Lucas, 2012). En ese sentido, una alternativa para el uso del estiércol es la digestión anaerobia, mientras que, para algunos estiércoles con poca humedad, es posible aplicar procesos termoquímicos.

En este estudio se determinó el potencial energético de la biomasa residual pecuaria de la UNALM para la producción de biogás y de esta manera poder satisfacer parte del consumo eléctrico de la universidad y por consiguiente disminuir el consumo eléctrico.

▣ PE según producción estequiométrica de biogás

Se halló el potencial energético de la biomasa al ser convertida en biogás, teniendo en cuenta la producción teórica de metano según el balance estequiométrico de la reacción:



De la ecuación 1, se obtuvo la cantidad de metano (moles) que se produce teóricamente y haciendo uso de la ecuación general de los gases: $PV = RTn$, se obtuvo el volumen de metano producido teóricamente a condiciones normales. Así mismo se halló el potencial energético de este volumen de metano, haciendo uso del PCI del metano (Fernández, 2016).

▣ PE según registros de productividad de biogás (m³/(kg SV)

Se determinó el potencial energético de la biomasa al ser convertida en biogás, teniendo en cuenta los valores experimentales encontrados en la bibliografía de productividad de biogás (volumen de biogás producido por kilogramo de sólidos volátiles) para cada especie animal. Se tiene en cuenta que son los sólidos volátiles los que contienen componentes orgánicos que teóricamente deben ser convertidos en metano, y que la conversión de biogás no se realiza al cien por ciento de su relación estequiométrica, por lo que se hizo uso de un modelo matemático aproxima-

mado para el potencial energético de la biomasa residual pecuaria, el cual se muestra en la ecuación 2.

En este modelo se tiene en cuenta el número total de cabezas (NA), la producción de materia seca por cabeza al año (MS), los sólidos volátiles presentes en la materia seca (SV), la producción de biogás reportada por otros autores (en m³/kg SV), el porcentaje de metano en el biogás (50%) y el poder calorífico inferior del metano (PCI_{CH₄}). Ello lo podemos observar en la Ecuación 2:

$$PE = \sum (NA_i * MS_i * SV_i * B_{o_i} * (0,5) * PCI_{CH_4_i}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

PE: Potencial energético (J/año)

NA: Número de animales [cabezas]

MS: Materia seca [Kg MS/cabeza-año]

SV: Sólidos volátiles [Kg sv/kg materia seca]

B_o: Producción de biogás [m³ /Kg SV]

PCI_{CH₄}: Poder calorífico inferior del metano [J/m³]

El subíndice *i* hace referencia al grupo o sector

2. Resultados y discusiones

La estimación de la generación de estiércol del número promedio y mínimo número de individuos en el rango de 10 años hasta la actualidad se muestra en la Tabla 1, donde la mayor generación de estiércol proviene de vacunos, con un promedio de 1.620.235 kg al año. En el caso de los cerdos, sabemos que los residuos en la Unidad Experimental de Cerdos se desechan en forma de efluentes. Si se requiere evaluar alguna alternativa de uso, lo adecuado es trabajar en base a datos de caudal para tener el volumen de residuos que se genera en esta unidad. A continuación, en la tabla 1 se muestra la generación de estiércoles generados en la Universidad nacional Agraria La Molina.

La caracterización fisicoquímica de los residuos nos permitió conocer su composición, lo cual será importante no solo para hallar su potencial energético sino al momento de seleccionar una tecnología para su aprovechamiento energético. El estiércol con mayor PCI es el de la sección de Ovinos y camélidos, lo cual puede deberse a que tiene los menores valores de humedad., pues el valor del PCI por sí mismo nos permite saber el potencial energético de toda la biomasa residual pecuaria sin considerar su transformación en biogás; es decir, solo la combustión directa de ese residuo y su transformación en energía.

Para hallar el potencial energético se usó el número promedio de animales de cada una de las unidades experimentales del campus, los datos de materia seca y sólidos volátiles según la producción de estiércol por cabeza al año. Finalmente se reemplazó esos datos en la ecuación 2 y se obtuvo el potencial energético (PE) en

Mwh/año de cada área experimental en la granja de zootecnia del campus. Ver Tabla 2.

Tabla 1. Generación promedio y mínima de residuos por especie en un periodo de 10 años

Especie	Estiércol (kg / día x animal)	Nº de animales	Generación estiércol / año (kg)
Vacunos	19.3	Prom. 230	1.620,24
		Min. 191	1.345,50
Cerdos	5.9	Prom. 309	665.431
		Min. 199	428.546
Aves	0.2	Prom. 3477	253.821
		Min. 2025	147.825
Equinos	15	Prom. 16	87.600
		Min. 7	38.325
Animales Menores	0.1	685	25.002
		464	16.936
Ovinos	1	131	47.815
		93	33.945
Total		4847	2.699.905

El potencial energético teórico total de la biomasa residual pecuaria obtenido por el balance estequiométrico es de 2134,55 MWh/año, mientras que el obtenido en base a los registros de producción de biogás, el cual es 745,14 MWh/año. El potencial energético experimental representa un 53,8% del potencial teórico estequiométrico. Este porcentaje se ajusta a lo reportado en la literatura, en la que encontramos un rendimiento experimental de biogás entre 38% - 79% para distintas mezclas de estiércol, en relación a la producción teórica (Solarte et al., 2017; Lobato, 2012). Las especies con menor potencial energético son las comprendidas en el área animales menores, seguido de ovinos y camélidos, equinos y aves. Además, la especie cuyos residuos presentan mayor potencial energético son los vacunos con un valor teórico de 1104,56 MWh/año. Asimismo, existen algunas experiencias de utilización de excrementos vacunos como energía (Filippín, 1998; Gonzales et al., 2017). Los resultados mencionados son similares al potencial hallado para vacunos en la granja de zootecnia, que alcanza los 400.4 MWh/año para un promedio de 230 vacas.

El potencial energético (PE) total obtenido en base a la reacción estequiométrica considera la transformación total de los elementos en metano y, en cambio, los valores de producción de biogás en m³ de biogás por kilogramo de sólidos volátiles (Bo), se han obtenido de los reportes experimentales de trabajos e investigaciones realizadas sobre producción de biogás a partir de la biodigestión de estiércoles de las distintas especies en condiciones mesófilas. El rendimiento real de metano de los digestores siempre es menor debido a que los procesos biológicos son altamen-

te complejos y los consorcios de bacterias metanogénicas que lo realizan son sensibles a cambios en las condiciones ambientales como temperatura, nutrientes, concentración de minerales, pH, condiciones redox óptimas y otros factores.

Tabla 2. Potencial energético según producción de Bo (m³/SV)

Unidad	Número de animales (NA)	Potencial energético (MWh/año)
Vacunos	230	400,04
Experimental de Aves	3477	104,38
Equinos	16	29,30
Animales Menores	685	19,14
Ovinos y Camélidos	131	39,24
Cerdos	309	153,04
Total		745,14

En principio, parte del aporte orgánico del sustrato se utilizará para la generación de nueva biomasa. Esta fracción es típicamente un 5-10% de la entrada de sólidos volátiles al sistema. Además, parte de la materia orgánica está unida a partículas inorgánicas y no estará disponible para la degradación microbiana, por lo cual un porcentaje de la materia orgánica saldrá del reactor sin degradarse, esta fracción representa otro 10%. Por otro lado, la lignina que contiene parte de la materia orgánica no puede degradarse en condiciones anaeróbicas y la diferencia que existe en la degradación que realiza cada animal resulta en diferencias variables en el contenido de lignina según cada especie. En esta investigación no se ha determinado el contenido de lignina ni se ha hecho uso de ecuaciones que requieran conocer dicho valor; sin embargo, con el uso de modelos matemáticos derivados de las cinéticas de la digestión anaerobia sería posible estimar la fracción biodegradable de los materiales que contienen lignina.

Otro de los motivos por los que la producción de metano de forma experimental es menor a la teórica es debido a que la degradación de la materia orgánica puede estar restringida debido a la falta de nutrientes suficientes para el crecimiento microbiano, por lo cual la relación carbono nitrógeno de cada materia prima es muy importante. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células, las bacterias metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno; sin embargo, aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento. Es por esto que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (FAO, 2011).

El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos y esta sustancia puede producirse durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre, tal como el estiércol de cerdo (FAO, 2011). Este es posiblemente la razón por la

cual el valor del potencial energético de los residuos porcinos hallado teóricamente es mayor que el potencial energético hallado con la ecuación matemática y valores experimentales registrados, siendo este último un 21.4% del primero.

En general, aproximadamente el 50-70% de los materiales biodegradables se convertirán en biogás en un reactor de biogás promedio, este rango es aplicable al estiércol, lodos de depuradora, desechos de restaurantes y desechos domésticos (Poulsen, 2003). Los resultados del potencial energético obtenidos en la presente investigación usando valores de producción de biogás están dentro de ese intervalo. Se sabe que es aconsejable utilizar potenciales de metano o biogás medidos en todas las condiciones en que se desea ejecutar el digestor; sin embargo, esto puede ser difícil pues existen muchas mediciones en plantas de biogás a gran escala que usan mezclas de diferentes materiales orgánicos como sustratos. Para el caso de la presente investigación se tuvo en cuenta estas condiciones y es por ello que se consideró valores de producción de biogás por kilogramo de sólidos volátiles reportados en digestores mesófilos y sustratos sin mezcla.

3. Uso energético

El potencial energético de los residuos pecuarios en base a los registros de producción de biogás es de 745,14 MWh/año, lo cual equivaldría al consumo promedio anual de 460 hogares de Lima Metropolitana en el 2018 (OSINERGMIN, 2018). La cogeneración térmica-eléctrica es una de las mejores opciones para el autoabastecimiento energético ya que posee una mayor eficiencia global (Carrasco, 2015). Por otro lado, existen diferentes tecnologías que permiten usos de biogás como las turbinas a vapor, las turbinas a gas, los motores de combustión interna y los ciclos combinados gas-vapor. En general, la decisión del uso entre una y otra tecnología, depende de las demandas eléctricas y térmicas a cubrir.

Dentro del campus existen 63 consumidores mayores de energía eléctrica que forman parte de diferentes rubros. Los laboratorios, centros de producción y oficinas administrativas son los rubros que, en conjunto, representan más del 50% del consumo de energía eléctrica.

El consumo anual de energía del campus UNALM es de 4293,3 MWh/año, dentro del cual la instalación con mayor consumo de energía es la Planta de Alimentos, la cual registra un consumo de 204,67 MWh/año que representa el 5.95% del consumo total del campus y unos 47278,8 soles peruanos de gasto anual (1 sol peruano = 0.26 dólar estadounidense en 01/06/2021). Dicha instalación tiene una ubicación cercana a la granja de zootecnia y debido a la naturaleza de su actividad productiva, se considera adecuado optar por un cogenerador de energía eléctrica-térmica, el cual, debido al potencial energético anual de los residuos pecuarios, podría abastecer la demanda de dicha instalación.

Actualmente, la Oficina Administrativa de la UNALM manifiesta una gran preocupación por la creciente demanda energética registrada en los últimos años. Es imprescindible emitir normativas que complementen la Directiva N°002 – 2018 – OGA – Directiva para la gestión de la Ecoeficiencia de la UNALM, con contenido específico

para el ahorro de energía eléctrica; además, conformar comités de fiscalización específicos que velen por el cumplimiento de las normas de la UNALM en torno al ahorro de recursos (Cáceres, 2019). Es por ello, que es importante estudiar los usos alternativos o necesidades de energía térmica dentro de las instalaciones del campus de la UNALM, e investigar si el uso de la energía térmica por co-generación se debería limitar a la reutilización para la biodigestión de los residuos.

4. Conclusiones

Dentro del campus encontramos diferentes unidades de producción pecuaria entre las cuales se tiene una producción promedio de 7397 kg/día de residuos a lo largo de 10 años y un número promedio de animales de 4847. De los diferentes tipos de animales, los vacunos y equinos son los que han variado menos en número a lo largo de los años.

La caracterización de los estiércoles muestra un contenido de humedad elevado, es por ello que el PCI, y por tanto el potencial energético, será menos eficiente si se considera como muestra fresca. El estiércol de ovinos y camélidos presentó el mayor PCI, siendo este 4,11 kw/kg debido a su bajo contenido de humedad. Las diferencias en el contenido de humedad pueden deberse a los distintos procesos de manejo de residuos empleados en las unidades experimentales, las cuales mantienen el estiércol fresco lejos de condiciones ambientales que promuevan su secado. El potencial energético de los residuos de vacunos y equinos, asciende a 429,34 MWh/año. Mientras que si se considera el total de residuos que producen las demás especies, se tiene un potencial energético de 745,14 MWh/año. El potencial energético de los Residuos Pecuarios representa el 17,35% del consumo energético que tuvo la UNALM en el año 2018, este porcentaje equivale a 311.891,28 soles peruanos. Por lo tanto, la biometanización de los residuos biodegradables del campus UNALM podría convertirse en una alternativa eficaz en la gestión tradicional de los residuos, capaz de generar energía renovable como el biogás; reducir el volumen y peso de los residuos que van a los rellenos sanitarios y disminuir la emisión de metano a la atmósfera.

Considerando la disponibilidad de la materia prima a través de los años para hacer una proyección confiable, sus características fisicoquímicas, disponibilidad según ubicación de la fuente de materia prima y el principal consumidor de energía eléctrica, se puede concluir que el estiércol vacuno y equino son los más viables para su aprovechamiento energético.

Diversos estudios realizados en la UNALM refieren mejores rendimientos cuando se realizan mezclas de estiércol, por lo que es recomendable realizar mezclas de estiércol para optimizar la relación C:N y de esta manera aumentar la producción de biogás. En este sentido, las investigaciones realizadas con anterioridad en la UNALM son de suma importancia para poder encontrar una mezcla óptima.

Concluimos que dentro del campus universitario existen, a la fecha, políticas y planes de mejora en el manejo de residuos sólidos urbanos, sin perjuicio de esto,

se recomienda optimizar la segregación de residuos sólidos orgánicos urbanos para que puedan servir también como materia prima de biometanización.

5. Aportes para el Maletín de Buenas Prácticas

La UNALM es una institución pública ligada a la seguridad alimentaria nacional, que se caracteriza por ser de tipo agropecuario y cuyas actividades generan residuos sólidos orgánicos como son los estiércoles provenientes de las diversas granjas experimentales. Asimismo, la institución tiene un alto consumo energético para atender las diversas actividades en el marco de su misión de formar profesionales (8 facultades y 12 carreras). Este escenario motiva en aplicar alternativas de sustituir parte de la demanda energética tradicional (energía fósil) por fuentes más amigables al medioambiente como es la biomasa (estiércoles) que se genera en las granjas de la UNALM.

Si bien es cierto que estos residuos son utilizados para los campos experimentales de investigación por los alumnos de la carrera de Agronomía, sin embargo, su alta generación no es totalmente aprovechada, lo cual constituye un problema: visual, altos costos de disposición, contaminación del paisaje, salubridad tanto para los animales y las personas. Una alternativa de solución al problema sería gestionar y tratar estos residuos para usos energéticos mediante la generación de biogás -por sus características- y ser usados para poder satisfacer la demanda de energía de las mismas unidades experimentales de la Facultad de Zootecnia como son la granja de cerdos, aves, cuyes, vacunos y ovinos, entre otros.

Por otro lado, la energía que se produciría por el biogás por medio de la digestión anaerobia de la biomasa de las granjas experimentales, va a permitir reducir costos en términos económicos y ambientales, como cumplir además con la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos 1278 y sus modificatorias (D.S.1501) y al mismo tiempo con los Objetivos del Desarrollo Sostenibles para instituciones educativas.

Referencias

- APHA (American Public Health Association, US) 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 2540 Solids. 214 – 227.
- ASTM (2007). D5865-07ª. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM (2015). D7582-15. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM (2016). D5373-16. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken.
- Binner, E., Méndez, C.L, Miyashiro, V. (2015). Gestión de Residuos Sólidos Municipales en el Perú y en Austria: Mitigación de impactos ambientales en el clima y el agua.
- Cáceres, R. (2019). Diagnóstico del consumo energético del campus UNALM. Dirección General de Administración. Universidad Nacional Agraria La Molina.

-
- Carrasco, J.L. (2015). Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: una estrategia para diferentes contextos. Universidad de Chile.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2011). Manual de biogás. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
- Fernández, A. (2016). Infraestructuras necesarias y modelo de negocio para el ayuntamiento de Barcelona sobre el vehículo eléctrico. UPC. Barcelona. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/104379>.
- Filippín, C. (1988). Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la facultad de agronomía de la Universidad Nacional De La Pampa.
- Gonzales, E., Castillo, F., Retto, C. (2017). Sistema de aprovechamiento de residuos orgánicos de ganado vacuno y su aplicación en la agropecuaria Campos del Chira E.I.R.L. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.
- De Lucas, A. I. y Del Peso, C. (2012). Bloque I. Concepto, clasificación y usos de la biomasa. En Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA (Ed). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad (pp. 04-12). Madrid, España. Recuperado de: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- De Lucas, A. I. (2012). Bloque II. Biocombustibles gaseosos. Ed. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA (Ed.). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad (pp. 58-77). Madrid, España. Recuperado de: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Lobato, A. (2012). Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros sustratos agroindustriales. Universidad de León. Instituto de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Biodiversidad. México. Recuperado de: https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/2241/tesis_08feb2.PDF;jsessionid=45EDBD6860C7FD2D88FDF0BFEA87D543?sequence=1
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). (2018). Informe de resultados de consumo y usos de la electricidad. Encuesta residencial de consumo y usos de energía - ERCUE 2018. Lima, Perú.
- Ouahid, E. & Afilal, M. (2017). Optimization of Treatment and Energetic Valorization of Chicken Droppings by Anaerobic Digestion. Oujda, Morocco. Recuperado de: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/CMJS/10987580.pdf>.
- Poulsen, T. (2003). Solid Waste Management. Chapter 5: Anaerobic Digestion. Aalborg University. Dinamarca. Recuperado de: http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/intwastech5_poulsen_2003.pdf
- Saico, L.K. (2003). Determinación de sustratos óptimos para la producción de biogás a partir de estiércol de ganado ovino, vacuno y porcino de los corrales de crianza de la UNALM. Tesis de post grado.
- Solarte, J., Mariscal, J. y Aristizábal, B. (2017). Evaluation of anaerobic digestion and co-digestion in laboratory scale bioreactors. Revista ION. Universidad Industrial de Santander.
-

CASO IV. Potencial teórico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables y herbáceos en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano

Quelbis Román Quintero Bertel^{1*}, Daniel Felipe Heredia González², Hernando Villalba Jiménez², Celso Libardo Mateus²

¹Director Grupo de Investigación Bioindustrias. Universidad Autónoma de Colombia. Bogotá D.C. – Colombia. ²Investigador Grupo Bioindustrias. Universidad Autónoma de Colombia.

Resumen. A raíz de las prácticas inadecuadas en los suelos, el cambio climático y la creciente demanda de bienes y servicios, en Colombia se ha agudizado la degradación del suelo con consecuencias directas en su productividad, la interrupción de los ciclos biogeoquímicos e impacto en el balance hídrico. Esto hace necesario identificar especies vegetales con pocos requerimientos de Nitrógeno, regulen el ciclo hidrológico, reciclen nutrientes y sean una fuente de energía renovable para restaurar zonas degradadas. En principio las especies forestales y herbáceas pueden ser la solución integral. El objetivo de este capítulo es la estimación del potencial teórico de la generación de energía eléctrica con algunos cultivos maderables y herbáceos en Colombia en suelos degradados. Fue necesario realizar identificar los requerimientos agroambientales, productividad, rendimiento, propiedades fisicoquímicas de las especies seleccionadas y así definir las áreas potenciales para el cultivo por especie y espacializar los potenciales energéticos con QGIS. Se obtuvieron mapas de potencial de suelos para cultivos energéticos maderables y herbáceos en todo el territorio colombiano. También se estimaron potenciales energéticos técnicos, suponiendo tecnologías con eficiencias globales de 15%. En Colombia existe un potencial energético teórico máximo de 38,34 GW y 38,1 GW con cultivos maderables o herbáceos, para un máximo de 5,75 GW y 5,7 GW de potencial energético técnico respectivamente con las mismas especies en suelos degradados. Se muestran los mapas de potencial energético teórico de la generación de energía eléctrica para cada especie seleccionada en el territorio colombiano según los criterios establecidos y los requerimientos agroclimáticos.

* Correspondencia: Quelbis Quintero Bertel. E-mail: quelbis.quintero@fuac.edu.co

1.Introducción

Existe una problemática mundial por las elevadas emisiones de gases efecto invernadero (GEI) responsables del cambio climático y de efectos adversos en el ambiente, economía y sociedad. Debido a la fuerte dependencia del petróleo usado como recurso energético en la generación de energía eléctrica y calor, industria, transporte y las construcciones, a las cuales se le atribuyen el 66% de las emisiones de GEI a nivel global (IPCC, 2014).

Con la elevada dependencia del petróleo, se acrecientan problemas con el recurso suelo. Según el IDEAM (2015) en Colombia aproximadamente el 40% del territorio presenta una degradación por erosión y un 11% por salinización con grado ligero, moderado y severo; esto se traduce en tierras con limitaciones productivas y el riesgo de desertificación. La degradación del territorio se debe a la creciente demanda de bienes y servicios de los suelos, el desconocimiento de sus funciones e importancia y de alternativas para su recuperación, restauración y rehabilitación, procesos de planeación y de ordenamiento del territorio en función de sus características, entre otros.

Con esta investigación se pretenden evidenciar el potencial teórico de generación de energía eléctrica con algunos cultivos maderables y herbáceos en Colombia en suelos degradados especializada.

Según Fernández Mayer (2017) la mayoría de los cultivos maderables o de árboles presentan una relativa baja demanda de nutrientes, alta tolerancia a suelos ácidos, además permiten capturar y retener el CO₂ (carbono atmosférico) de forma eficiente mitigando el efecto invernadero. Con la implantación de cultivos maderables en ecosistemas tropicales conlleva a fortalecer la conservación del suelo disminuyendo la erosión y compactación del suelo causada por las lluvias, igualmente evitan el arrastre de partículas del suelo (materia orgánica) y pueden absorben nutrientes de capas profundas del suelo, asimismo en conjunto con cultivos herbáceos como pastos y forrajes promueven el reciclaje de nutrientes.

Colombia dispone de 32 especies domesticadas de plantas maderables y herbáceas postuladas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural con varios fines en los planes de desarrollo, para el desarrollo de este trabajo se seleccionaron 23 especies por sus condiciones agroclimáticas, características y beneficios especiales, considerados como cultivos energéticos maderables y herbáceos. (Tabla 1)

1.1. Cultivo energético

Se puede llamar cultivo energético a todo cultivo no alimentario destinado a la producción de energía térmica y eléctrica o biocarburantes (bioetanol, biodiésel, biogás, biometanol, biometiléter, bioETBE, bioMTBE, biocarburantes sintéticos, biohidrógeno, aceite vegetal puro, etc.). Actualmente los cultivos energéticos pueden ser una solución a los problemas energéticos y ambientales simultáneamente, por la capacidad de capturar carbono y convertirlo en carbono renovable como recurso energético (Figura 1). Los cultivos energéticos ofrecen la posibilidad de

aprovechar y recuperar suelos degradados, regular el ciclo hidrológico, reciclar nutrientes, así mismo de minimizar conflictos entre la seguridad energética, seguridad alimentaria y conservación del ambiente (Rincón y Silva, 2015). En este contexto, surge la importancia de alcanzar la "eficiencia fotosintética" de las especies como la suma de las efectividades individuales de una gran cantidad de procesos complejos y relacionados que tienen lugar tanto en las plantas como en su entorno (Bassam, 1998).

Tabla 1. Especies de cultivos maderables y herbáceos seleccionadas. Elaborada por autores.

Especies de Árboles	Nombre científico
Aliso	<i>Alnus acuminata</i>
Roble	<i>Tabebuia rosea</i>
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>
Tambor	<i>Schizolobium parahyba</i>
Piñón de oreja	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i>
Abarco	<i>Cariniana pyriformis</i>
Moncoro	<i>Cordia gerascanthus</i>
Eucalipto rosado	<i>Eucalyptus grandis</i>
Eucalipto	<i>Eucalyptus tereticornis</i>
Eucalipto pellita	<i>Eucalyptus pellita</i>
Eucalipto	<i>Eucalyptus camandulensis</i>
Eucalipto	<i>Eucalyptus saligna</i>
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>
Pino caribe	<i>Pinus caribaea</i>
Pino	<i>Pinus patula</i>
Pino blanco	<i>Pinus maximinoi</i>
Pino	<i>Pinus oocarpa</i>
Pino	<i>Pinus tecunumanii</i>
Acacia	<i>Acacia mangium</i>
Melina	<i>Gmelina arborea</i>
Pasto Elefante	<i>Pennisetum purpureum</i>
Pasto King grass	<i>Pennisetum purpureum x Pennisetum typhoides</i>

Por lo mencionado anteriormente, en Europa se ha aumentado el desarrollo de proyectos de investigación, sobre los aspectos agronómicos de los cultivos (variedades, rendimientos, áreas de cultivo) y la valoración del potencial energético de los cultivos energéticos maderables y herbáceos incluyendo sus residuos (tallos y hojas) para la generación de energía. Según Niño Lozano (2011), es recomendable tener en cuenta la ordenación del territorio (POT, PBOT y EOT) para disminuir los costos de operación logística en la implementación de los cultivos energéticos.

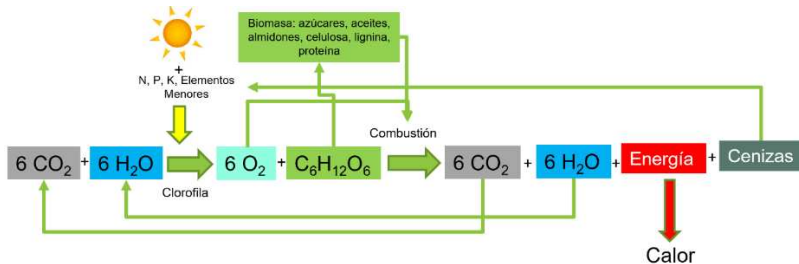


Figura 1. Ciclo de la biomasa y energía (Fuente: Adaptado de Bassam, 1998).

1.2. Aspectos claves para seleccionar biomasa como cultivo energético

Ceotto y Di Candilo (2011) plantean unas claves determinantes para seleccionar plantas como cultivo energético, las cuales se mencionan a continuación:

- ☐ El cultivo energético seleccionado debe tener una elevada tasa de crecimiento diaria.
- ☐ Debe permitir realizar el mantenimiento de la arquitectura del dosel, que a su vez, juega un importante papel en la absorción de la radiación solar y elevación de la eficiencia fotosintética
- ☐ La biomasa cosechada debe ser preferiblemente sobre la superficie de la tierra. La recolección de productos subterráneos requiere demasiada energía.
- ☐ Los cultivos energéticos deben tener bajos requerimientos de nitrógeno. Principalmente porque la fabricación de fertilizantes nitrogenados requiere mucha energía, lo que reduce el rendimiento energético neto de los cultivos energéticos y aumenta sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero.
- ☐ La biomasa debe contener niveles bajo de humedad, es decir, lo más seca posible. Retirar la humedad de la biomasa aumenta los costos de transporte, además, de requerir energía extra para secar.
- ☐ El cultivo energético debe ser resistente a patógenos, porque la necesidad de fumigar contra hongos e insectos implica el uso de energía, lo que reduce la producción neta de energía, sin embargo, los plaguicidas consumen más energía que los fertilizantes nitrogenados.
- ☐ El cultivo energético debe ser un fuerte competidor contra las malas hierbas, labores culturales para su control amerita un gran consumo de energía

- ☒ El cultivo energético debe ser resistente a la sequía y al frío; es importante que tenga una buena capacidad de recuperación después de periodos secos
- ☒ El cultivo energético debe tener un bajo consumo de agua. Hay que tener en cuenta, que el riego implica un uso sustancial de energía y también impone una demanda de recursos limitados de agua dulce. Es recomendable seleccionar especies con un sistema de enraizamiento extendido y profundo para explotar los recursos hídricos en un perfil de suelo profundo, normalmente no disponible para la mayoría de las plantas cultivadas.
- ☒ El cultivo energético debe tener elevada luz solar en relación con la intensidad y calidad espectral de la luz, así como el tiempo de duración del periodo luminoso. Ya que se sabe que la alta intensidad de luz y de concentración de CO₂ tienen una relación directa proporcional generando una alta tasa fotosintética.
- ☒ Tener en cuenta la ruta o ciclo de carboxilación para las reacciones desencadenadas por la enzima rubisco presente en las plantas que presentan implicaciones en la eficiencia de asimilación del CO₂ y la respuesta eco fisiológica del cultivo energético. Los cultivos energéticos maderables siguen ciclo carboxilación C3. Ver tabla 2.

De acuerdo con Fernández Mayer (2017) las plantas C3 predominan zonas tropicales de clima templado y frío por lo que poseen una mayor adaptación fisiológica para condiciones de poca radiación solar y a bajas temperaturas. En condiciones normales de radiación solar las plantas C3 pueden perturbar su proceso fotosintético en la asimilación de carbono por saturación lumínica a altas intensidades de luz (rango entre 690 y superior a 1389 μ moles / m² / s) (Fernández Mayer, 2017).

En la actualidad, especialmente en los países desarrollados, existe un mayor y fuerte avance en incentivar, establecer y mantener las plataformas de biorefinería de biomasa para lograr la sostenibilidad. Donde se pueden aprovechar los productos asimilados sintetizados de la fotosíntesis con diferentes fines, además de la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, también para la utilización de los coproductos de los procesos de transformación y los excedentes de producción para la obtención de productos de alto valor agregado, así como para generar energía en forma eléctrica o calor (Pérez et al., 2015).

Tabla 2. Parámetros para la eficiencia fotosintética de las plantas C3. (Fuente: Rincón y Silva, 2015)

Parámetro	Plantas C3
Hábitat típico	Distribución amplia
Periodo de fijación de C	Día
Temperatura óptima de fijación de CO ₂ (°C)	15 - 25
Efecto de las altas temperaturas	Aumento de proceso de fotorrespiración
Nivel de saturación de radiación solar (Wm ²)	50 - 150
Producción de Materia Seca (Mg ha ⁻¹)	22

año ⁻¹)	
Producción Máxima	34 - 39
Producción Bruta (GJ ha ⁻¹ día ⁻¹)	5.8 - 6.7
Asimilación neta de CO ₂ (mg CO ₂ dm ⁻² h ⁻¹)	20 - 30
EUA (g CO ₂ kg ⁻¹ H ₂ O)	1 - 3
Foto respiración	Hasta 40% fotosíntesis neta
Ventajas	Más eficientes en regiones frías y húmedas con intensidad de luz moderada.

1.3. Potencial energético teórico

El potencial energético teórico es definido por el IPCC como la cantidad de energía física que puede ser usada en un lugar específico durante un determinado periodo de tiempo (e.j. un año). Está condicionado por el agua, clima, tipo de suelo, especie vegetal, gestión en la producción de la especie y producción primaria bruta - PPB y/o producción primaria neta - PPN (Rincón y Silva, 2015). Ahora, el crecimiento y desarrollo de un cultivo forestal es función de la productividad del sitio, donde se expresa el potencial de los recursos edafos climáticos y biológicos que actúan promoviendo o limitando el crecimiento. La calidad del sitio se utiliza como indicador de la PPN de un bosque y el sitio como la combinación de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos (microclima y competencia) que determinan la productividad (Laclau, 2006).

Según Rincón y Silva (2015) el potencial energético teórico -PET- de la biomasa maderable o herbácea se puede calcular el PET mediante:

$$PET = V \times D_b \times PCI \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

PET: Potencial Energético Teórico [MJ / año],

V: Volumen de biomasa [m³ / año],

Db: Densidad básica [kg / m³],

PCI: Poder calorífico Inferior [MJ / kg]

1.4. Características de las especies

Se seleccionaron 23 especies maderables y 1 herbácea (ver Tabla 3) que tienen potencial de ser implantados como cultivos energéticos en algunas zonas del país, dependiendo de sus condiciones climáticas, ecológicas y edáficas. Se tuvieron en cuenta parámetros de temperatura, la altura, y la precipitación para determinar la región adecuada y óptima en la cual pueda ser cultivada la especie. También se identifican propiedades fisicoquímicas como el poder calorífico (PCI), la densidad básica, y el volumen de producción al año. Algunas de estas especies ya se trabajan en Colombia bien sea para fines comerciales, energéticos o de protección. Ver tabla 3.

2. Materiales y Metodología

Una vez revisada la literatura científica acerca de las 23 especies estudiadas (condiciones agroclimáticas, características y propiedades de las plantas C3, eficiencia fotosintética, productividad o rendimiento de biomasa, requerimientos y condiciones naturales, poder calorífico -PCI-, la densidad básica, y la producción o rendimiento de biomasa al año). Ver Tabla 3. Se procedió a identificar los suelos degradados susceptibles de aprovechamiento mediante cultivos energéticos en el territorio colombiano; donde se identificaron 8.880.014 hectáreas con algún grado de degradación ligera, moderada y severa por erosión y/o salinización para implementar cultivos maderables y herbáceos; y así evitar los conflictos del uso del suelo con la producción de alimentos y las áreas de protección o reserva ambiental.

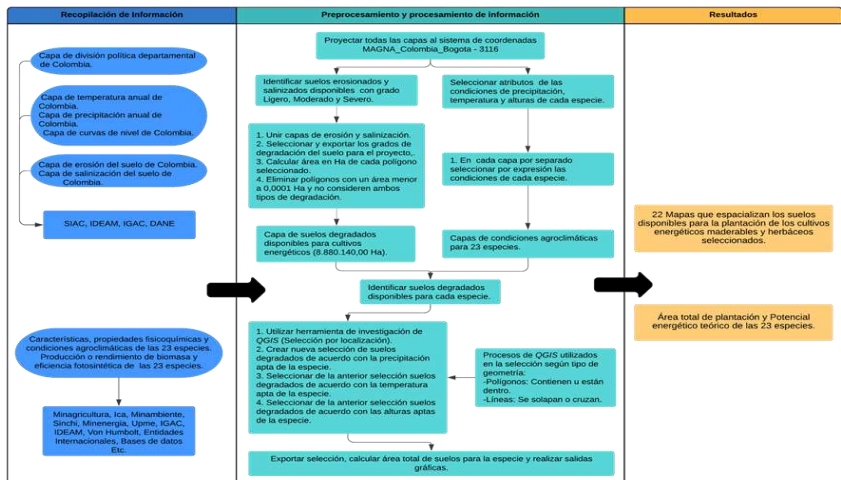


Figura 2. Modelo Metodológico. Elaboración propia

Se utilizaron los shape´s generados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el Instituto de Asuntos Ambientales y Meteorológicos – IDEAM. Los datos fueron analizados como atributos, superponiendo los parámetros edafoclimáticos, con el uso potencial de los suelos sobre las áreas degradadas, con el fin de no generar conflictos de uso del suelo con la producción de alimentos, áreas de protección ambiental y usos urbanos, a la vez internalizar el pasivo ambiental generado por la erosión y la salinización de los suelos. Fue utilizada la herramienta libre QGIS 3.10.7 (Figura 2).

3. Resultados

Las condiciones agroclimáticas y las propiedades físico-químicas de las 23 especies seleccionadas se muestran en la Tabla 3. Con la ayuda de las herramientas de QGIS y los parámetros de cada especie se estimaron las áreas potenciales de aprovechamiento y su respectiva especialización en el territorio Colombia. Una vez seleccionadas las áreas y aplicando la ecuación (1) se estimaron los potenciales energéticos teóricos de cada especie, en función del poder calorífico inferior de cada especie y el área aprovechable. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3 y la Figura 2. La espacialización de las tierras aptas para cada cultivo se pueden observar en el anexo A.

Es importante aclarar que las áreas mostradas no son exclusivas para una misma especie maderable o herbácea a sembrar, pueden hacerse combinaciones generar energía eléctrica más sostenible por medio de la diversidad y rotación de cultivos.

Tabla 3. Características de 21 especies maderables seleccionadas (Fuente: elaboración propia).

Especies maderables	Nombre científico	Altura (msnm)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Aliso	<i>Alnus acuminata</i>	1.600 - 3200	4-18	1.000-3.200
Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	0 – 1.700	20 - 27	1.100–3.000
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	50-1.400	22-28	1.500–3.000
Tambor	<i>Schizolobium parahyba</i>	100-1.400	20-30	1.200–2.500
Piñón de oreja	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0-1200	23-30	700-2.500
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i>	1.200-2.500	15-20	1.500–2.000
Abarco	<i>Cariniana pyriformis</i>	0–800	24	2.000–5.000
Moncoro	<i>Cordia gerascanthus</i>	0–1.200	18-27	1.000–4.000
Eucalipto rosado	<i>Eucalyptus grandis</i>	100–2.200	21	900–4.000
Eucalipto	<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0-1.500	24	500-3.500
Eucalipto pellita	<i>Eucalyptus pellita</i>	0–800	4-37	900–4.000
Eucalipto	<i>Eucalyptus camadulensis</i>	0–1.400	24	400–1.500
Eucalipto	<i>Eucalyptus saligna</i>	0-2.100	15-22	800–4.000
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	2.200-2.800	14-18	700–1.800
Pino caribe	<i>Pinus caribaea</i>	0–1.000	9-15	1000–2.000
Pino	<i>Pinus patula</i>	1.500-3.100	13-18	1600–2.500

Pino blanco	<i>Pinus maximinoi</i>	700–2.400	18-22	1000-2.400
Pino	<i>Pinus oocarpa</i>	600-2.100	13-23	750–2.500
Pino	<i>Pinus tecunumanii</i>	450–2.400	14-22	1000–2.400
Acacia	<i>Acacia mangium</i>	0–1.000	22-28	1000–3.000
Melina	<i>Gmelina arborea</i>	0–1.300	21-28	750–5.000

Tabla 3. Características de 21 especies maderables seleccionadas (Fuente: elaboración propia, continúa)

Especies maderables	Producción (m ³ /ha*año)	Densidad básica (kg/m ³)	PCI (kJ /kg)	Ref.
Aliso	0,69	300	19.255	[2-7]
Roble	5	710	19.325	[8]
Caoba	15	585	19.928	[9,10]
Tambor	23	350	19.928	[10,11]
Piñón de oreja	9,2	390	18.556	[10,12]
Algarrobo	17	880	19.928	[10,13]
Abarco	8,54	550	19.325	[14]
Moncoro	16	740	19.928	[12]
Eucalipto rosado	40	475	19.228	[12]
Eucalipto	34	870	19.228	[12-20]
Eucalipto pellita	30,12	580	18.541	[12-21]
Eucalipto	22	800	18.541	[12-22]
Eucalipto	29	560	18.541	[12-20]
Eucalipto	20	550	18.541	[12]
Pino caribe	5,27	585	20.482	[10-12]
Pino	4	434	20.482	[12-24]
Pino blanco	17,5	445	20.482	[12-,25]
Pino	20	460	20.482	[12-26]
Pino	25	485	20.482	[12-27]
Acacia	32	525	19.928	[12-28]
Melina	29	490	19.928	[29]

Tabla 4. Características de 2 especies herbáceas seleccionadas.

Especies herbáceas	Nombre científico	Altitud (msn m)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Producción de biomasa (ton /ha*año)	PCI (KJ/Kg)	Ref.
Pasto elefante	<i>Pennisetum purpureum</i>	0 - 2200	15 - 27	800 - 2500	20,5	17150	[36, 37]
Pasto king grass	<i>Pennisetum purpureum</i> <i>Pennisetum typhoides</i>	0 - 2500	16 - 27	1000 - 4000	28,0	22039	[38-39, 41]

En la Figura 3 se evidencia el área apta para la generación de energía por cada especie estudiada para futuros aprovechamiento.

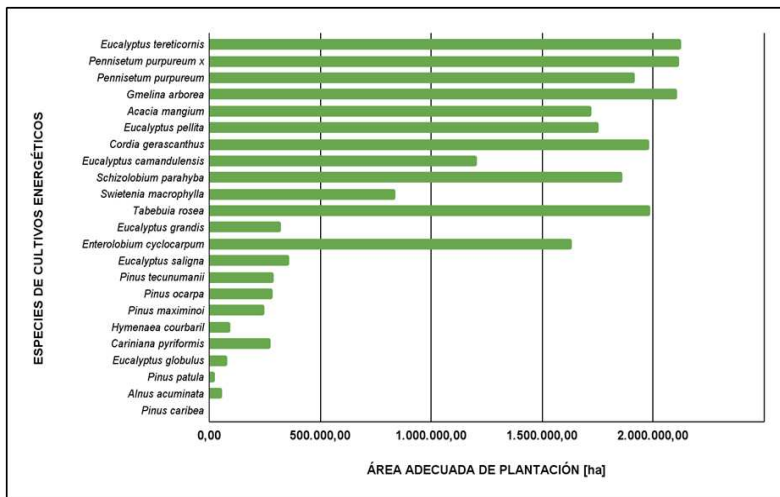


Figura 3. Diagrama de barras de la cantidad de hectáreas adecuadas para diferentes especies de cultivos energéticos maderables y herbáceos. (Fuente: elaboración propia, 2021).

Las especies con mayor área apta para implantación de sistemas agroenergéticos corresponden a *Eucalyptus tereticornis* (2.126.030 Ha), *Pennisetum purpureum x Pennisetum typhoides* (2.117.980 Ha) y *Gmelina arborea* (2.109.810 Ha). Las especies con áreas aptas entre 1 y 2 millones de hectáreas correspondiente a *Tabebuia rosea* (1.988.790 Ha), *Cordia gerascanthus* (1.981.260 Ha), *Pennisetum purpureum* (1.916.190 Ha), *Schizolobium parahyba* (1.863.340 Ha), *Eucalyptus pellita* (1.757.140 Ha), *Acacia mangium* (1.721.070 Ha), *Enterolobium cyclocarpum* (1.631.870 Ha) y *Eucalyptus camadulensis* (1.204.730 Ha). Las especies con áreas

aptas entre 100.000 hectáreas y 1 millón de hectáreas corresponden a *Swietenia macrophylla* (837.314 Ha), *Eucalyptus saligna* (358.167 Ha), *Eucalyptus grandis* (323.004 Ha), *Pinus tecunumanii* (291.190 Ha), *Pinus oocarpa* (287.201 Ha), *Cariniana pyriformis* (276.114 Ha) y *Pinus maximinoi* (248.627 Ha). Por último, las especies con áreas aptas menores a 100.000 Ha, corresponden a cinco especies: *Hymenaea courbaril* (97.389 Ha), *Eucalyptus globulus* (80.903 Ha), *Alnus acuminata* (56.561 Ha), *Pinus patula* (34.574 Ha). Según el objeto de estudio y los requerimientos de las especies analizadas el *Pinus caribaea* no cuenta con las condiciones agroclimáticas para su producción en Colombia.

En la Figura 4 se presenta el potencial energético teórico de cada especie analizada. Las especies con mayor potencial energético teórico superior a los 30,0 GW son: *Eucalyptus tereticornis* (38,34 GW), *Pennisetum purpureum x Pennisetum typhoides* (38,06 GW) y *Pennisetum purpureum* (21,36 GW). Especies con un potencial energético teórico entre 30,0 y 10,0 GW se tienen: *Gmelina arborea* (18,94 GW) y *Acacia mangium* (18,27 GW) y las especies con potencial energético teórico a 10,0 GW; son: *Schizolobium parahyba* (9,48 GW), *Pinus maximinoi* (1,26 GW), *Eucalyptus globulus* (0,52 GW), *Pinus patula* (0,03 GW), y *Alnus acuminata* (0,01 GW). Las otras especies no mencionadas tienen un potencial energético de cero.

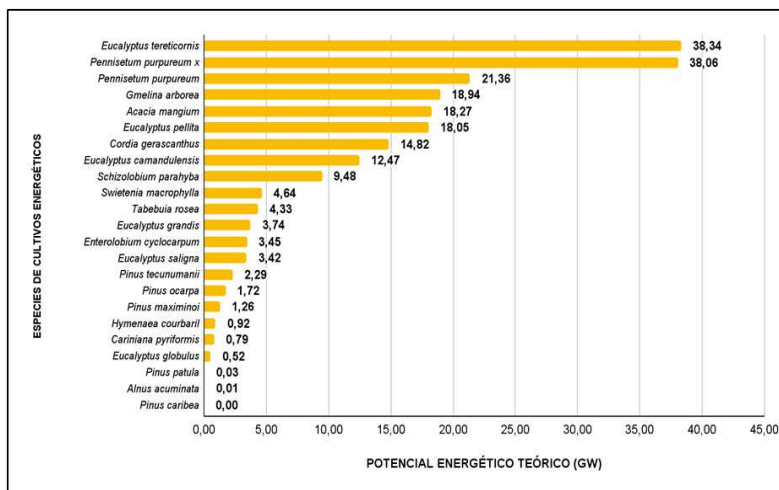


Figura 4. Diagrama de barras del potencial energético teórico (GW) para diferentes especies de cultivos energéticos maderables y herbáceos, en relación con las hectáreas adecuadas. (Fuente: elaboración propia, 2021).

El potencial técnico estimado sin tener en cuenta la distancia entre la localización de la biomasa y la planta de generación. Así mismo, asumiendo una eficiencia global de generación de energía eléctrica de 15% (con las tecnologías disponibles), se obtienen los valores mostrados en la figura 5. Se puede observar que el máximo potencial técnico de generación de energía eléctrica se alcanza con la especie maderable *Eucalyptus Tereticornis* con un valor de 5.75 GW o con *Pennisetum purpureum x Pennisetum typhoides* con 5.71 GW, que al ser comparado con la capacidad de generación de energía instalada en Colombia (17.3 GW), este potencial técnico de generación representa el 33% aproximadamente. Siendo algo menor el potencial técnico alcanzado con *Pennisetum purpureum* (3.2 GW) y *Gmelina arborea* (2.8 GW).

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que algunas especies presentan requerimientos agroclimáticos compatibles con las condiciones presentes en las áreas donde se localizan los suelos degradados, sobresaliendo las especies maderables (*Eucalyptus tereticornis* y *Gmelina arborea*) y la especie herbácea (*Pennisetum purpureum x Pennisetum typhoides*), las cuales superan los 2 millones de hectáreas posibles para cultivo en el territorio degradado. Esto sugiere ser una gran oportunidad para Colombia, a la vez que propone retos en cuanto a la domesticación de estas especies, estrategias de producción de germoplasma y técnicas de producción para elevar su capacidad de adaptación y productividad.

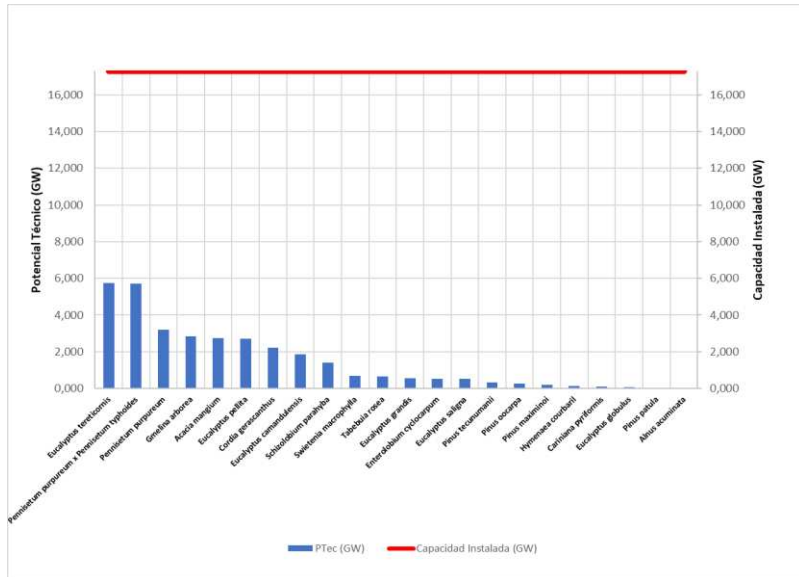


Figura 5. Potencial técnico de generación de energía eléctrica para Colombia con cultivos energéticos maderables y herbáceos (Fuente: elaboración propia, 2021).

Las especies *Eucalypto terecticornis* y *Pennisetum purpureum* resultaron ser las más adecuadas como cultivos energéticos porque presentan una relativa baja demanda de nutrientes permitiéndoles adaptarse a condiciones naturales particulares para su producción de biomasa, alta tolerancia a suelos ácidos o alcalinos, capturan y almacenan niveles elevados del carbono atmosférico; a la vez, tienen una amplia distribución en clima templado y frío.

Las especies que mejor se adaptan a temperaturas elevadas se pueden mencionar: *Tabebuia rosea*, *Swietenia macrophylla*, *Eucalyptus pellita*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea*. Son especies que se adaptan a temperaturas desde 20 hasta los 28 °C, en alturas desde los 0 a 1500 msnm y el rango de precipitación de 1000 a 3000 mm. Según los resultados obtenidos las zonas aptas para estos cultivos son la región caribe y la región central con latitudes bajas.

Las especies que mejor se adaptan a temperaturas bajas son las que usualmente se cultivan en altitudes elevadas y altas precipitaciones. Se pueden mencionar: *Alnus acuminata*, *Hymenaea courbaril*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus patula* y *Pinus oocarpa*. Son especies que se adaptan a temperaturas desde los 4 hasta 15° C. Además, su altura óptima de cultivo va desde los 1500 hasta los 3000 msnm y con un rango de precipitación de 1000 a 4000 mm. Según los resultados obtenidos la zona apta de cultivo en suelos degradados se da en las cordilleras central y oriental, ocupando también una parte de la Orinoquia colombiana.

Las especies *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides* y *Pennisetum purpureum* se consideran especies de clima medio. Pueden ser encontradas aptas en zonas con altitudes entre los 0 a 2500 msnm, con temperaturas entre 10 a 28° C y precipitación entre los 1000 a 3000 mm y que generalmente tienen un rendimiento energético elevado.

En el Anexo I se muestra la espacialización de las tierras aptas para cada cultivo en el territorio colombiano.

4. Conclusiones

El potencial energético teórico de los cultivos energéticos maderables y herbáceos está principalmente condicionado por las condiciones agroclimáticas de cada especie seleccionada, sumada a aplicación de técnicas de adaptación para las condiciones de suelos degradados.

El máximo potencial técnico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables en Colombia es de 5.75 GW (*Eucalyptus Terecticornis*) o con cultivos herbáceos es de 5.71 GW (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides*). Equivalente al 33% de la capacidad instalada actualmente.

Se hace necesario realizar más investigaciones enfocadas a estrategias de domesticación y multiplicación de germoplasma mejorado, con el fin de elevar la productividad y mejorar la oferta de bioenergía en la matriz energética en el marco de la transición energética demandada.

Para un adecuado uso del suelo degradado disponible y aprovechamiento de las condiciones climáticas naturales de Colombia, se recomienda el uso simultáneo de varias especies maderables y herbáceos en sistemas agrosilvopastoriles o agroforestales, con el fin de garantizar una transición energética sostenible.

Es necesario evaluar los aspectos sociales, ambientales y desarrollo económicos de cada proyecto de generación de energía eléctrica con las especies analizadas como recurso energético, teniendo en cuenta que los cultivos energéticos suponen ser una estrategia eficaz de mitigación y adaptación al cambio climático debido al almacenamiento y captura de carbono atmosférico, así como para la restauración de los suelos degradados, sin generar conflictos de uso del suelos con cultivos alimentarios, ganadería o silvopastoril, con la consecuente ampliación de la oferta bioenergía y la diversificación de la matriz energética.

5. Aportes para el Maletín de Buenas Prácticas

Los sistemas de información geográfico nos permiten integrar conocimientos científicos con disciplinas aplicadas con el fin de analizar y espacializar los resultados encontrados. Sin embargo, es muy importante tener definido la base conceptual de las proyecciones necesarias para alcanzar los mapas que se desean obtener.

Debido al volumen de datos y atributos que se requieran analizar para este tipo de trabajo, es vital contar con un equipo computador de alto desempeño, preferiblemente en clúster. Otro aspecto determinante es la selección de los atributos, en el cual se debe definir el código adecuado (expresión: mayor que, menor que, igual que) y el tipo de archivo (línea: curvas de nivel; estar dentro: precipitación o temperatura). Es importante eliminar los por código todas las áreas menores a 1m2, pues ocasiona distorsión al área verdaderamente aprovechable. Estas recomendaciones son claves para obtener datos confiables.

Referencias

- [1] Fernández Mayer, Aníbal E. (2017). Producción de carne y leche bovina en sistemas silvopastoriles. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/7668>
- [2] Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos para la Producción de Energía (2015). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Corporación Ema. <https://ianas.org/wp-content/uploads/2020/07/ebp01.pdf>.
- [3] Niño Lozano, JF. (2011). Potencial y beneficio socio-ambiental del uso de materiales lignocelulósicos generados en proyectos lineales. [Tesis de Magister, Universidad Nacional de Colombia - Medellín] <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11659>
- [4] Laclau, P. (2006). Fijación de Carbono en ecosistemas boscosos y herbáceos del Norte de la Patagonia. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Comahue - Argentina] <http://hdl.handle.net/20.500.12123/7431>

-
- [5] Bassam, N. 1998. C3 AND C4 PLANT SPECIES AS ENERGY SOURCES AND THEIR POTENTIAL IMPACT ON ENVIRONMENT AND CLIMATE. *Renewable Energy* 15. Pág. 205 – 210.
- [6] Restrepo U., G.; BellefleuR, P. L'aulne des Andes de Colombie: ecologie et identification. *Bois et Forêts des Tropiques* 247:53-68. 1996.
- [7] Ospina Penagos Carlos Mario, Hernández Restrepo Raúl Jaime. (2005). El Aliso o Cerezo *Alnus acuminata* H.B.K. ssp. *acuminata*. 18/01/2021, de Cenicafe.org Sitio web: <https://www.cenicafe.org/es/publications/aliso.pdf>
- [8] Hernández Restrepo Raúl Jaime, Ospina Penagos Carlos Mario (2008). El Guayacán rosado o Roble *Tabebuia rosea* (Bertol) DC. 18/01/2021, de Cenicafe.org Sitio web: <https://www.cenicafe.org/es/publications/aliso.pdf>
- [9] Egúez Préxell. Jorge Dante (1999). Evaluación técnica-económica de plantaciones de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Honduras. 18/01/2021, de ZAMORANO Departamento de Recursos Naturales y Conservación Biológica Sitio web: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2690/1/CPA-1999-T043.pdf>
- [10] Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CO-NABIO - Instituto de Ecología, UNAM.
- [11] Ospina Penagos Carlos Mario, Posada Florez Francisco Javier. (2003). El cultivo del tambor aspectos fitosanitarios limitativos en Colombia. 18/01/2021, de Cenicafe.org Sitio web: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/581/1/026.pdf>
- [12] El semillero. (2005). Adaptación, Usos, Madera, Vivero, Rendimientos y Silvicultura de 95 especies. 18/01/2021, de Elsemillero Sitio web: http://elsemillero.net/nuevo/semillas/listado_especies.php?id=76#:~:text=Crecimiento%3A%20Hasta%2035%20m.%20de,9.2%20m3%20Fha%20Fa%20C3%B1.
- [13] Ribaski J. (2002). Potencial del Algarrobo en sistemas silvopastoriles en el semiárido de Brasil. 18/01/2021, EMBRAPA - Centro de Investigación Forestal, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/3/y4435s/y4435s0c.htm>
- [14] Farfán Valencia, Fernando. (2012). Árboles con potencial de ser incorporados en sistemas agroforestales con café. 18/01/2021, de FNC -Cenicafe Sitio web: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/746/1/lib37949.pdf>
- [15] Hernández Restrepo Raúl Jaime, Ospina Penagos Carlos Mario (2010). EL NOGAL CAFETERO *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. 18/01/2021, de Cenicafe.org Sitio web: <https://www.cenicafe.org/es/publications/nogal.pdf>
- [16] AENE Consultoría S.A. (2003). Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia: Informe Final. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, de: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1287>
- [17] CIAT/CVC/Desolcon Andina S.A.S (Centro Internacional de Agricultura Tropical /Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). (2014). Identificación del potencial de generación eléctrica con fuentes no convencionales de energía renovable para aprovechamientos a pequeña escala en el Valle del Cauca. Valle del Cauca., Colombia, de: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Potencial_FNCE.pdf
-

-
- [18] UPME/Ideam/Colciencias (Unidad de Planeación Minero Energética/Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia/Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación). (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bogotá D.C., Colombia. de: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- [19] SIAC. (2012) ,Sistema de Información Ambiental de Colombia, Suelos en Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, de: <http://www.siac.gov.co/sueloscolombia>
- [20] BANCO DE SEMILLAS FORESTALES. (2019). EUCALIPTO ROJO (EUCALYPTUS TERETICORNIS). 21/01/2021, de CATIE Sitio web: <http://bsf.catie.ac.cr/listing/eucalipto-rojo-eucalyptus-tereticornis-2890497686.html>
- [21] CORPOICA: Eucalyptus Pellita, Especie multipropósito al servicio de la ganadería de los llanos orientales. (2007).<http://bsf.catie.ac.cr/listing/eucalipto-rojo-eucalyptus-tereticornis-2890497686.html>
- [22] FAO. (2006). Eucalyptus camaldulensis. 21/01/2021, de Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Sistemas Agroforestales Sitio web: http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/redes/sisag/arboles/C hi-e-ca.htm
- [23] BANCO DE SEMILLAS FORESTALES. (2019). SALIGNA (EUCALYPTUS SALIGNA) 21/01/2021, de CATIE Sitio web:<http://bsf.catie.ac.cr/listing/saligna-eucalyptus-saligna-4005470384.html>
- [24] Ospina Penagos Carlos Mario, (2011).Pinus patula Schiede and Deppe in Schlecht. & Cham. [cenicafe.org](https://www.cenicafe.org) Sitio web: <https://www.cenicafe.org/es/publications/pinus.pdf>
- [25] Arboretum. (2015). Pinus maximinoi. 18/01/2021, de Universidad Francisco Marroquín Sitio web: <https://arboretum.ufm.edu/plantas/pinus-maximinoi/>
- [26] Alvaro Vallejo. (2018). Pino oocarpa. 18/01/2021, de Forestal Maderero Sitio web: <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/pino-oocarpa.html>
- [27] BANCO DE SEMILLAS FORESTALES. (2019). Pino rojo (Pinus tecunumanii)). 21/01/2021, de CATIE Sitio web: <http://bsf.catie.ac.cr/listing/pino-rojo-pinus-tecunumanii-2217979225.html>
- [28] Alvaro Vallejo. (2018). Acacia mangium. 18/01/2021, de Forestal Maderero Sitio web: <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/acacia-mangium.html>
- [29] Alvaro Vallejo. (2018).Melina. 18/01/2021, de Forestal Maderero Sitio web: <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/melina.html>
- [30] Pérez, J., Barrera, R. & Ramírez, G. (2015). Integración de plantaciones forestales comerciales colombianas en conceptos de biorrefinería termoquímica: una revisión. Colombia Forestal, 18(2), 273-294. Base de datos: SciELO – Scientific Electronic Library Online: <https://scielo.org/>
- [31] UPRA. (2018). Lineamientos de política: plantaciones forestales con fines comerciales para la obtención de madera y su cadena productiva. Colombia, Bogotá. <https://www.upra.gov.co/documents/10184/13821/PLANTACIONES+FORESTALE+S+CON+FINES+COMERCIALES+PARA+LA+OBTENCI%C3%93N+DE+MADERA+Y+SU+CADENA+PRODUCTIVA/051c6fbc-ae53-4bf6-8e45-a0d64939c391?version=1.1>
-

-
- [33] IDEAM, MADS, U.D.C.A. (2015). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia - 2015. IDEAM. Bogotá D.C. Colombia. 188 p. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023646/023646.html>
- [32] IDEAM, U.D.C.A. (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de los suelos por erosión en Colombia - 2015. MADS. Bogotá D.C. Colombia. 62 p. <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/publicaciones-ideam>
- [34] IPCC. (2014). Chapter 5 - Drivers, Trends and Mitigation. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Obtenido de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter5.pdf
- [35] UPME. (2015). Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050. Ministerio de Minas y Energía. http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf
- [36] Martínez Viloria. F. (2020). Ficha Técnica Pasto King Grass Morado (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides*). Suecia. Recuperado de: <https://infopastosyforrajes.com/pasto-de-corte/pasto-king-grass-morado/>
- [37] Rodríguez Martínez, Byron R. & Romero Pérez, Jerson N. (2017). Evaluación del potencial energético del Zacate "KING GRASS" (*Pennisetum purpureum*), en El Salvador. [Tesis de Pregrado, Universidad de El Salvador] Repositorio: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13120>
- [38] Martínez Viloria. F. (2019). Ficha Técnica Pasto Elefante Merker (*Pennisetum purpureum* cv. Merker). Suecia. Recuperado de: <https://infopastosyforrajes.com/pasto-de-corte/pasto-elefante-pennisetum-purpureum-cv-merker/>
- [39] Salazar Zaledón, E. (2016). Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de Arundo donax, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica. [Tesis de Magister, Instituto Tecnológico de Costa Rica - TEC] <http://hdl.handle.net/2238/6817>
- [40] Cortes Martínez, D. E., & Olarte Blandon, O. J. (2018). Pasto de corte king grass morado (*Pennisetum Purpureum* x *Pennisetum Typhoides*), una esperanza forrajera en la colonia agrícola de Acacias. Documentos De Trabajo ECAPMA, (1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2772>
- [41] Tinoco Valarezo, Joel, E. (2017). Evaluación de la influencia de la fertilización potásica en el poder calorífico del King Grass (*Pennisetum purpureum*). [Tesis de Pregrado, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano - Honduras] <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1045971>
- [42] Roncallo, B., Sierra, A. M., & Castro, E. (2012). Rendimiento de forraje de gramíneas de corte y efecto sobre calidad composicional y producción de leche en el Caribe seco. Ciencia & Tecnología Agropecuaria, 13(1), 71-78. https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num1_art:2
- [43] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Geografía y Cartografía – Grupo Interno de Trabajo Generación de Datos y Productos Cartográficos (2009). Cartografía Básica Digital Integrada. República de Colombia. Escala 1:100.000. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
-

-
- [44] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2019). Capa Digital Curvas de Nivel. República de Colombia. Escala 1:100.000. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- [45] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Subdirección de Meteorología - Grupo de Climatología y Agrometeorología. (2012). Temperatura Media Anual y Pisos Térmicos durante el periodo 1971 a 2000. República de Colombia. Año 2012. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [46] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental - Grupo de Suelos y Tierras. (2015). Zonificación de la degradación de suelos por erosión. Área continental de Colombia. Escala 1:100.000. Línea base 2010 - 2011. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [47] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Subdirección de Meteorología - Grupo de Climatología y Agrometeorología. (2016). Anomalía de la Precipitación Anual para el año 2012. República de Colombia. Año 2015. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [48] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Subdirección de Ecosistemas e información Ambiental - Grupo de Suelos y Tierras. (2019). Zonificación de la susceptibilidad de los suelos a degradación por salinización escala 1:100.000. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- [49] Ceotto, E. y Di Candilo, M. 2011. Sustainable Bioenergy Production, Land and Nitrogen Use. En: Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Springer. Paris. Pág. 101 - 12

ANEXO A. Mapas Potencial Energético Teórico De Cultivos Energéticos Maderables Y Herbáceos En Colombia.

En todos los mapas siguientes, considerar el siguiente detalle en la leyenda, que solo varía en función de la especie considerada.



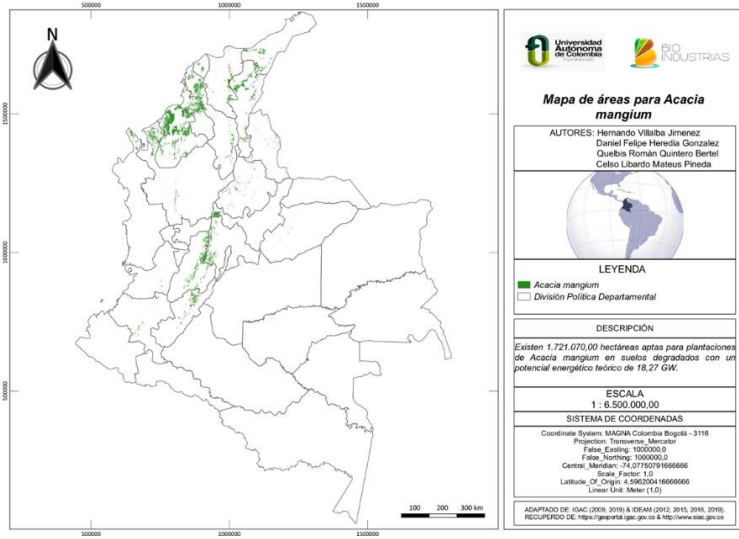


Figura 5. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Acacia mangium* en Colombia.

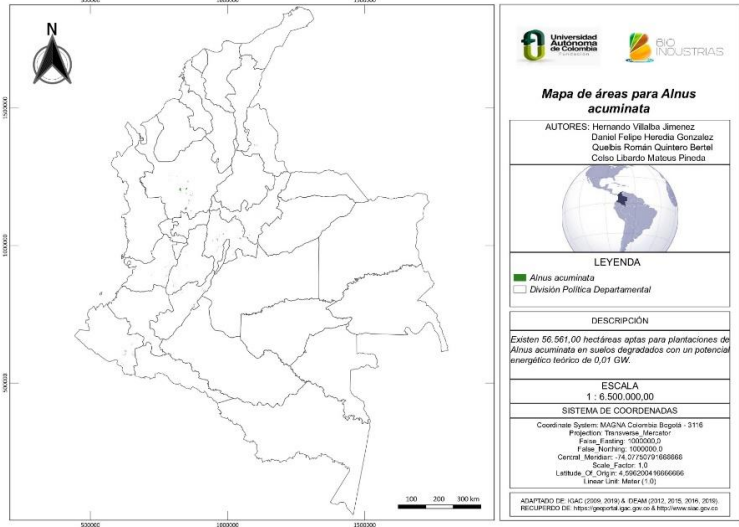


Figura 6. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Ainus acuminata* en Colombia

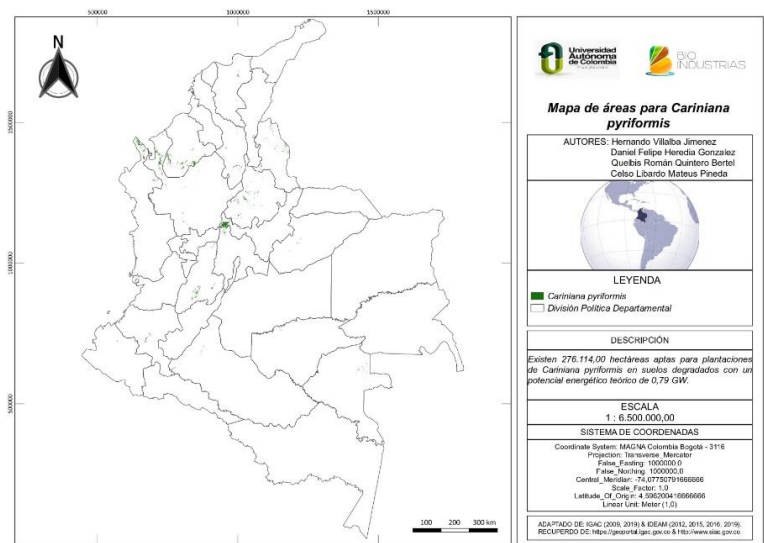


Figura 7. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Cariniana Pyriformis* en Colombia.

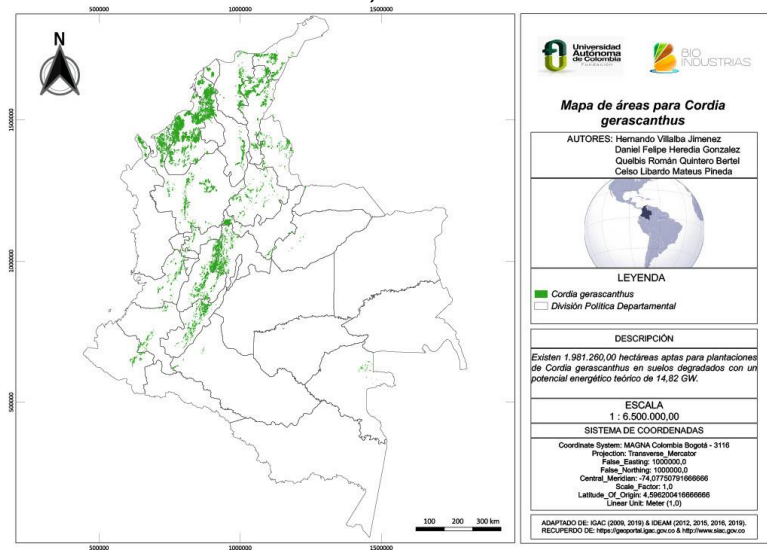


Figura 8. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Cordia gerascanthus* en Colombia

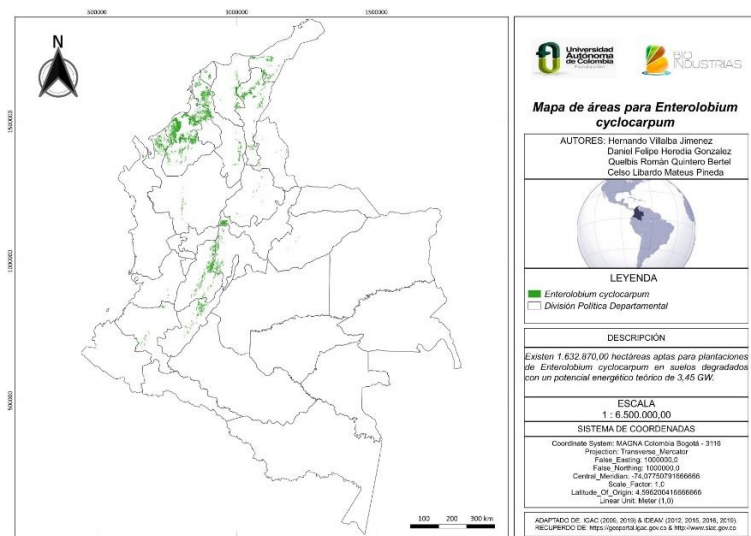


Figura 9. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Enterolobium cyclocarpum* en Colombia.

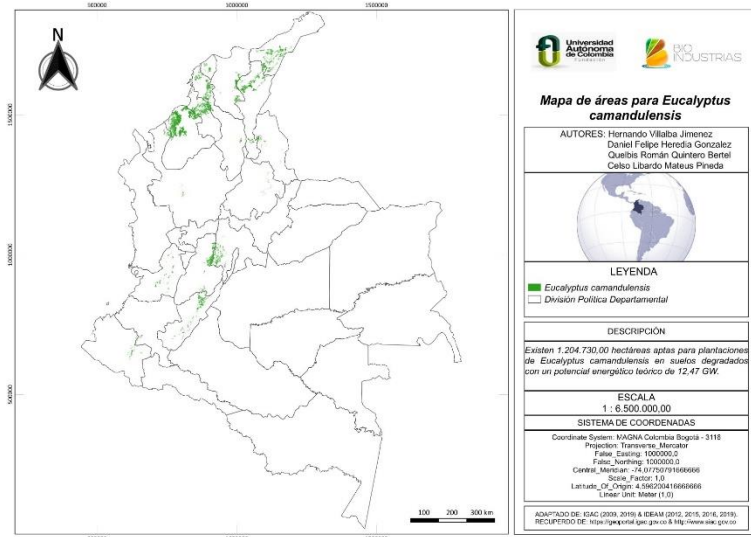


Figura 10. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus camadulensis* en Colombia.

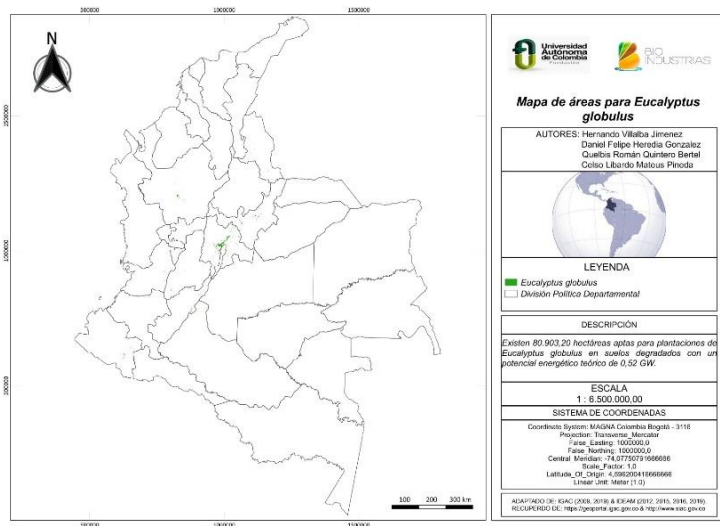


Figura 11. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus globulus* en Colombia.

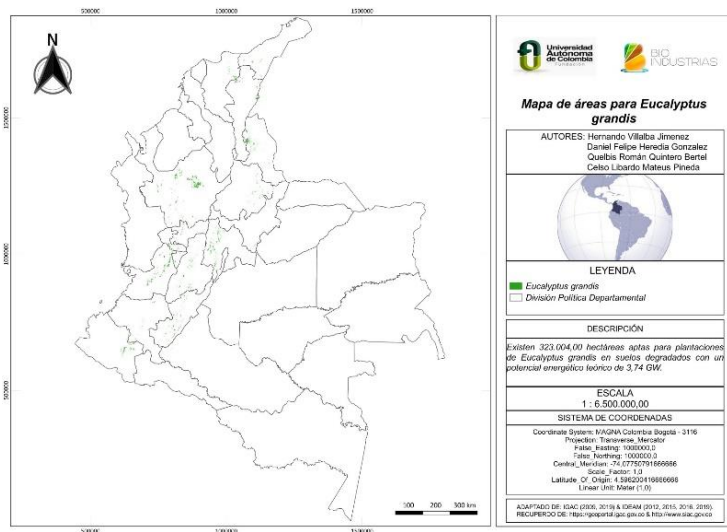


Figura 12. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus grandis* en Colombia

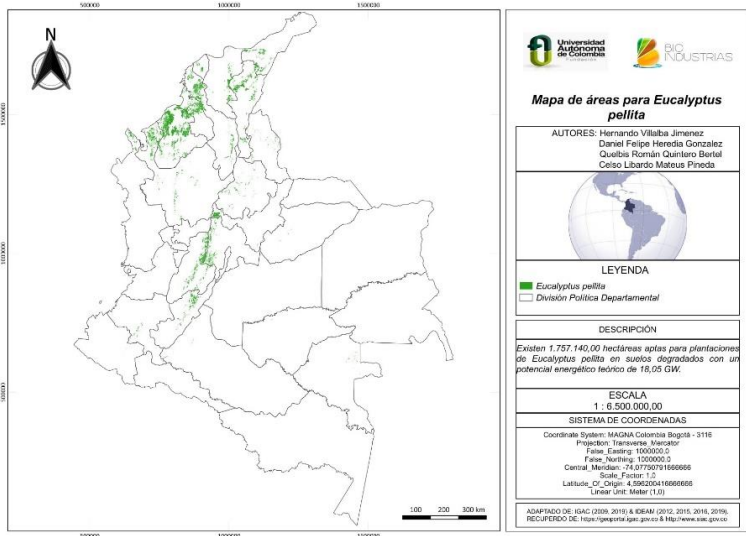


Figura 13. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus pellita* en Colombia.

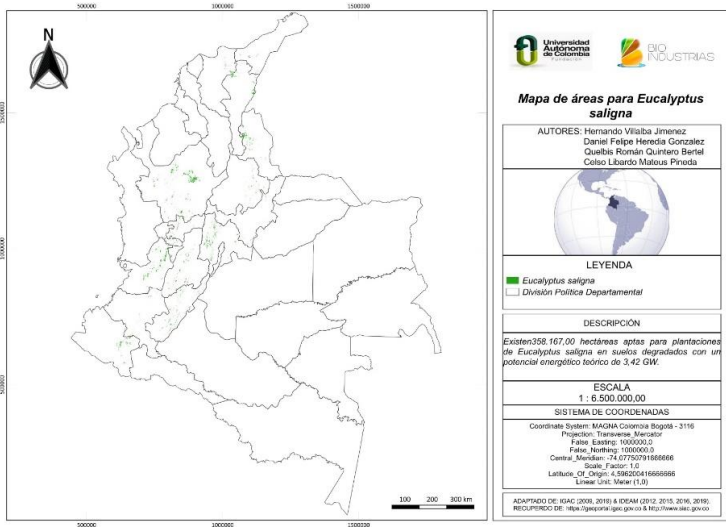


Figura 14. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus pellita* en Colombia

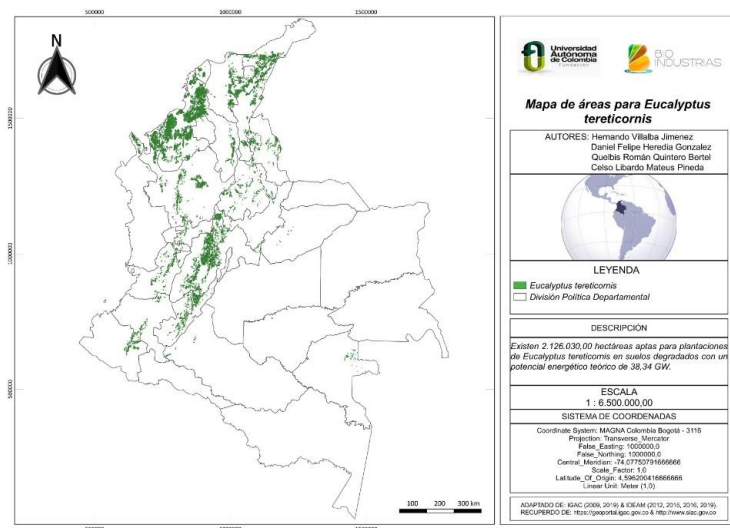


Figura 15. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Eucalyptus tereticornis* en Colombia.

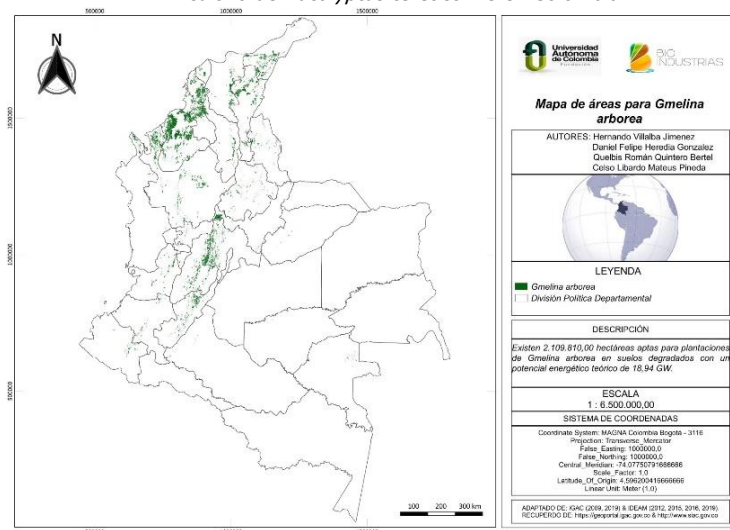


Figura 16. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Gmelina arborea* en Colombia

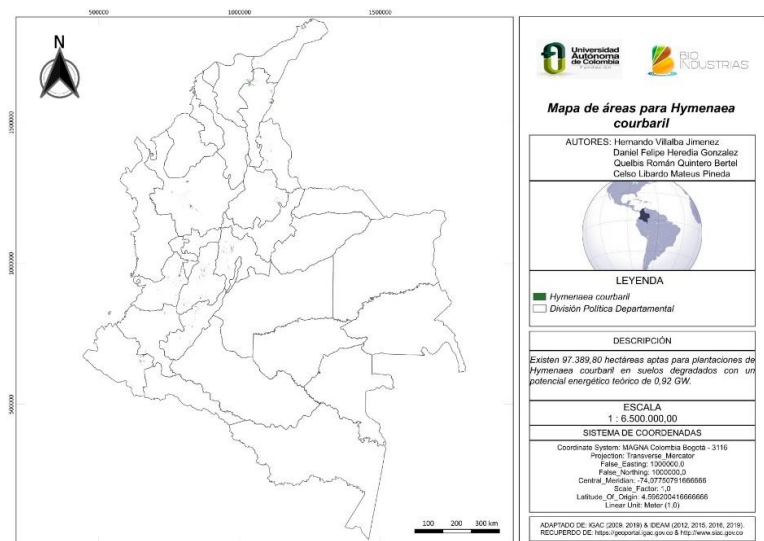


Figura 17. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Hymenaea courbaril* en Colombia

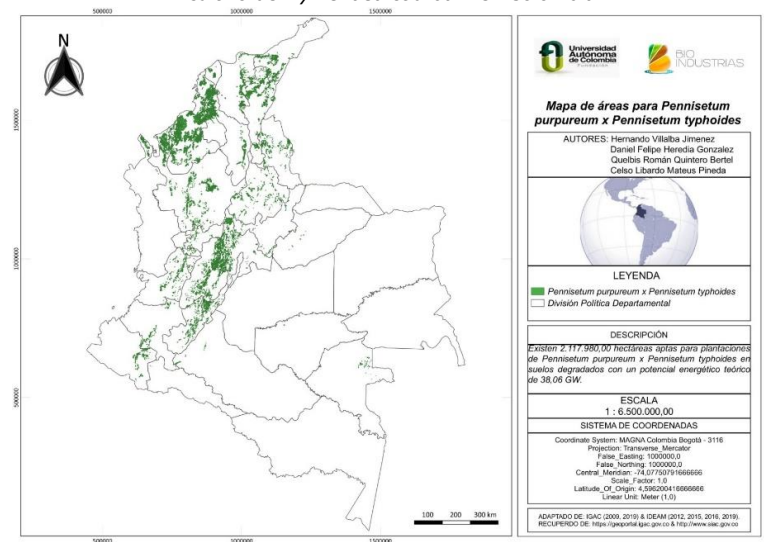


Figura 18. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides* en Colombia

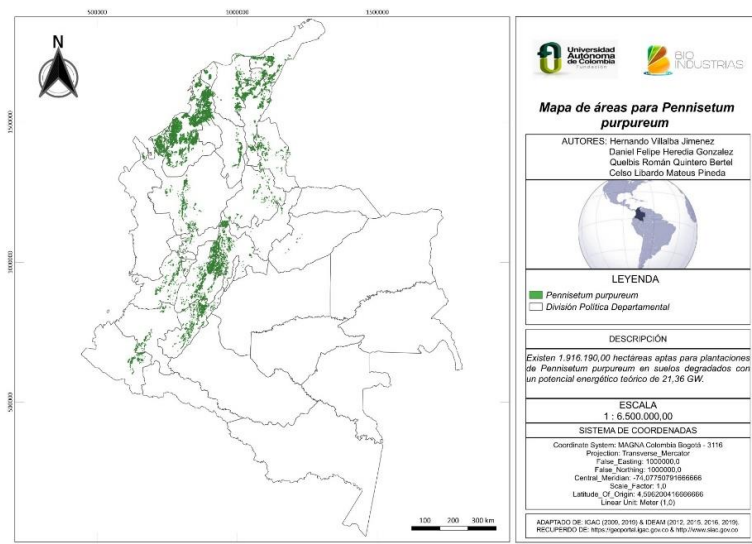


Figura 19. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pennisetum purpureum* en Colombia

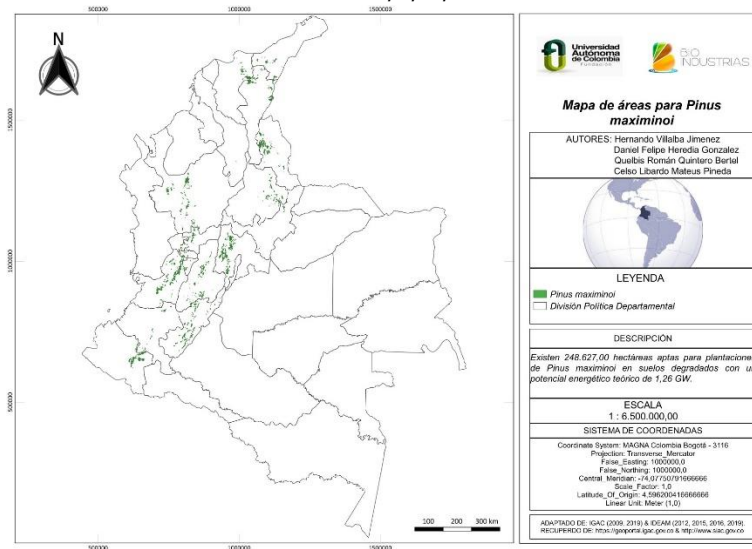


Figura 20. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pinus maximinoi* en Colombia

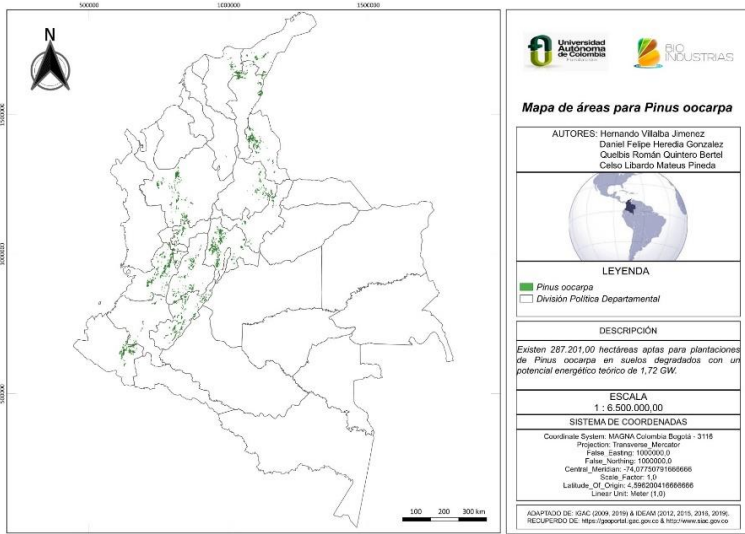


Figura 21. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pinus oocarpa* en Colombia

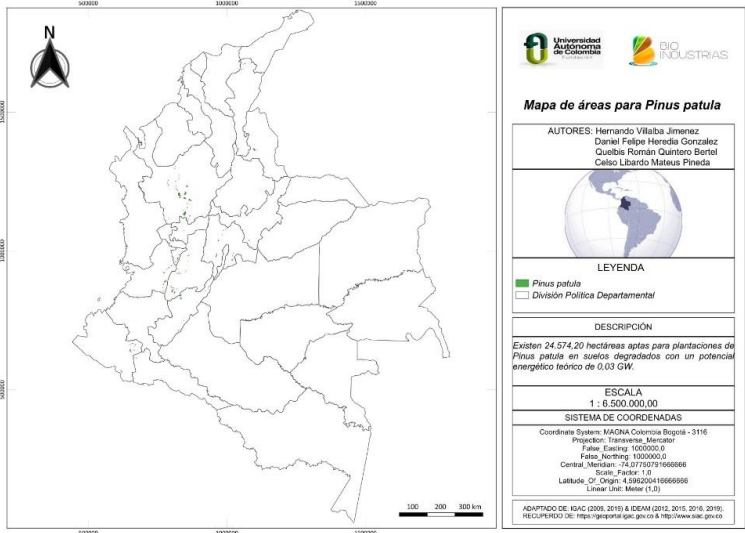


Figura 22. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pinus patula* en Colombia

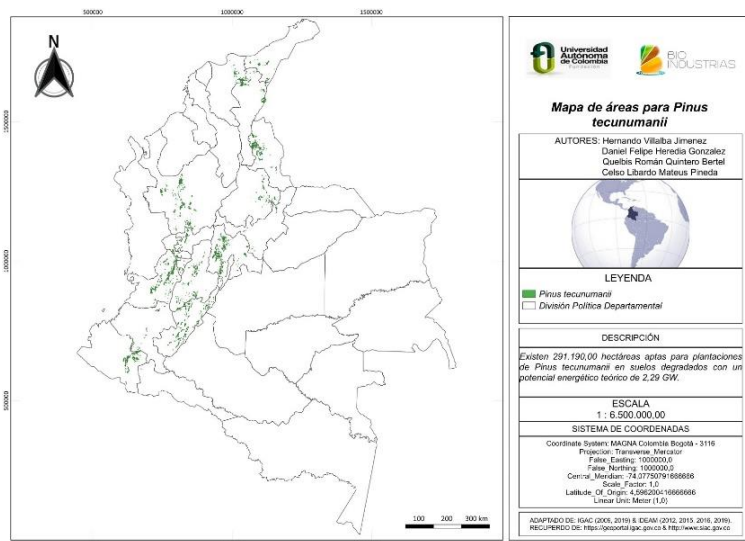


Figura 23. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de *Pinus tecunumanii* en Colombia

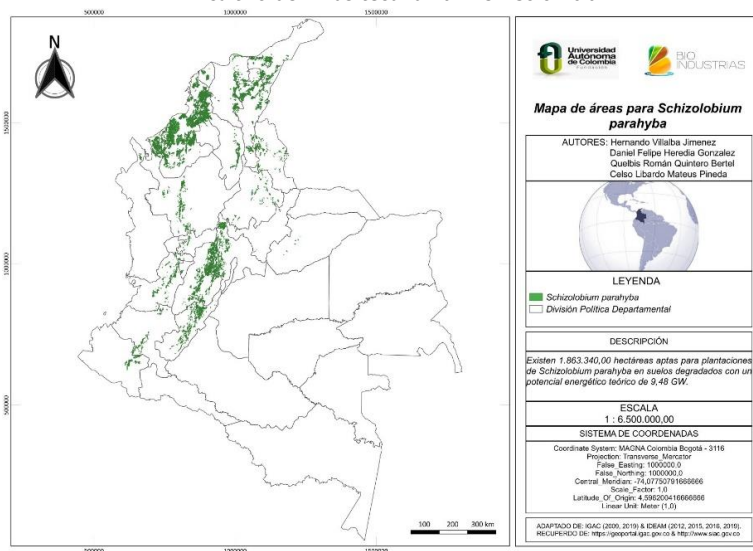


Figura 24. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de la *Schizolobium parahyba* en Colombia

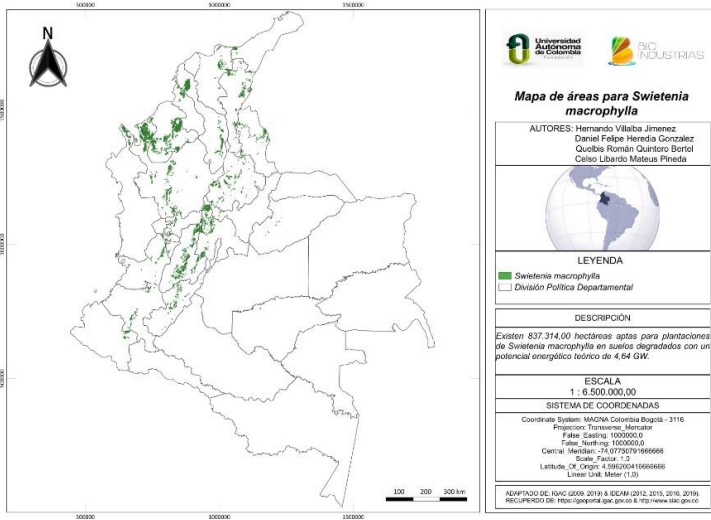


Figura 25. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de la *Swietenia macrophylla* en Colombia

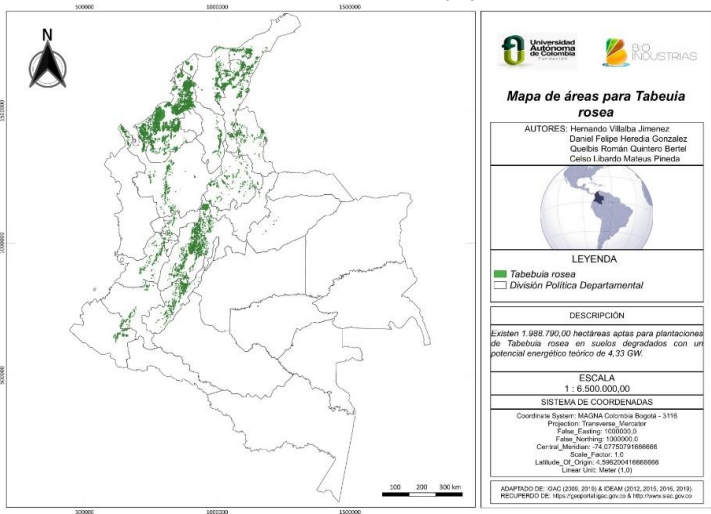


Figura 25. Espacialización de las áreas potenciales en tierras degradadas para el cultivo de la *Tabebuia rosea* en Colombia



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso V, 2021: 99-113
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO V. Formulación de una herramienta de cálculo para estimar la energía y el potencial de generación a partir de biomasa

Jose M. Rincón*¹, Jessica A. Agresott¹

¹ *Centro de Desarrollo Industrial - CenDI, Bogotá, Colombia.*

Resumen. El cambio climático causado por las emisiones de gases de efecto invernadero es una problemática por la que atraviesa el mundo actual. Una solución a este problema es evitar estas emisiones utilizando biomasa residual (BR) para la generación de energía y de esta manera ayudar a la descarbonización del planeta. Existen tres principales tecnologías de generación de energía eléctrica con biomasa residual: combustión, gasificación y digestión anaeróbica. En el presente documento se comparte una herramienta de cálculo de energía y potencia para estas tecnologías utilizando BR, definida en una plantilla sencilla y de fácil manejo que sirva de base para el desarrollo de plantillas personalizadas.

*Correspondencia: José Rincón Martínez. E-mail: joserinconmartinez@gmail.com.

Introducción

El cambio climático es una problemática que atraviesa el mundo actual. Cerca de hace 500 millones de años la concentración de CO₂ en la atmósfera era de 7000 ppm, hace 35 millones de años de 1000 ppm, hace 100 años de 280 ppm y en los últimos años se ha venido incrementando debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzando una concentración superior a 420 ppm. En este contexto, día a día vemos un aumento de la concentración y como consecuencia un aumento de la temperatura global, por este motivo nos vemos obligados a evitar el uso de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural a combustibles de biomasa como leña, biocombustibles y biogás renovable.

El uso de la biomasa para la generación de energía se ha extendido y ha crecido a nivel mundial debido a los problemas ambientales causados por la utilización de combustibles fósiles, como la emisión de gases de efecto invernadero causante del cambio climático y la alta producción de residuos que afectan el medio ambiente local. El uso de la bioenergía, como medio para la descarbonización global se fundamenta en que la biomasa consume CO₂ durante su crecimiento, el cual se emite durante su combustión, es decir, no hay emisiones netas de gases de efecto invernadero (Rincon J.M., Gastón R., Islas J.M., Lizarde J.E., 2014).

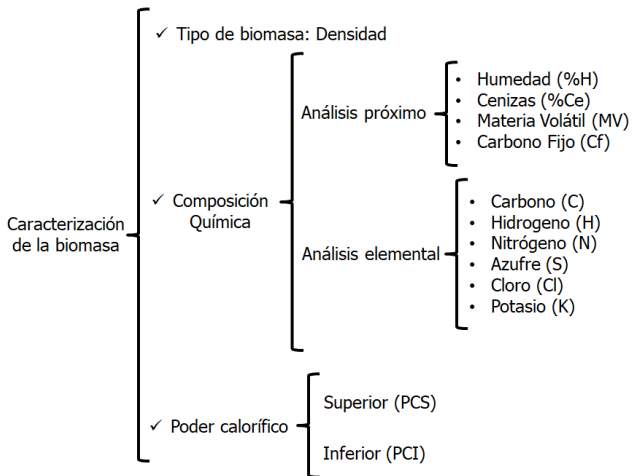


Figura 1. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa. Fuente: Elaboración propia

La biomasa constituye más del 10% del suministro mundial de energía primaria y es la cuarta fuente de energía almacenada más grande del mundo, después del petróleo, el carbón y el gas natural. La demanda de biomasa con fines energéticos

se estima en 53 EJ1. Cerca del 86% de esta cantidad se utiliza en la producción de calor, cocción de alimentos y para aplicaciones industriales; el 14% restante se utiliza en la generación eléctrica y biocombustibles. (Rincon J.M., Gastón R., Islas J.M., Lizarde J.E., 2014).

Para el uso de la biomasa como fuente energética, es importante conocer las propiedades fisicoquímicas que son determinantes para la valoración de la energía proveniente de la biomasa residual. Las propiedades fisicoquímicas de las diferentes biomásas establecen las pautas para la determinación del potencial energético y la selección de posibles tratamientos y procesos de generación (Figura 1).

A continuación, en la Tabla 1, se muestra la composición fisicoquímica para diferentes especies forestales reportadas por Pérez y colaboradores (Pérez Bayer & Osorio Vélez, 2014).

Tabla 1. Composición fisicoquímica de algunas especies forestales

Propiedad	<i>Pinus Patula</i>	<i>Eucalyptus Grandis</i>	<i>Acacia Mangium</i>	<i>Gmelina Arborea</i>
Densidad aparente (kg/m ³)	164,09	281,3	186,04	151,52
Humedad (%) (a)	9,36	8,54	5,79	10,08
Materia volátil (%)	72,57	67,35	73,25	72
Carbono fijo (%) (b)	27,17	32,34	26,46	27,24
Cenizas (%)	0,26	0,31	0,29	0,77
PCI b.s (kJ/kg)	18.948	18.489	18.694	18.582

(Fuente: Pérez Bayer & Osorio Vélez, 2014)

(a): Humedad con la que se realizan las pruebas experimentales; (b): Calculado

Los residuos de biomasa se clasifican en residuos lignocelulósicos (leñosos) para la generación eléctrica y en residuos biodegradables (no leñosos) para su transformación biotecnológica a biogás que será utilizado como combustible en las plantas de generación eléctrica.

1.1. Cálculo del potencial energético

El potencial energético (PE) se puede definir como la cantidad de biomasa disponible en un determinado espacio geográfico multiplicado por el poder calorífico superior asumiendo que la biomasa está totalmente seca (Ecuación 1). En la práctica, la biomasa posee una humedad residual o una humedad en equilibrio con el ambiente que influye negativamente en el poder calorífico aprovechable; a este valor se le conoce con el nombre de Poder Calorífico Inferior.

¹ EJ (Exajulios) y 1 EJ=10¹⁸ Julios

$$PE = \text{Poder calorífico inferior} * \text{masa de BR} \quad (\text{Ec. 1})$$

En forma general, el cálculo del potencial energético aprovechable (PEA) que utiliza diferentes biomasa residual, se calcula por medio de la Ecuación 2; donde BR es la cantidad de biomasa residual, n es el tipo de biomasa y PCI es el poder calorífico inferior teniendo en cuenta la humedad de la biomasa; así que el potencial total será igual a la sumatoria del potencial aportado por cada uno de los tipos de biomasa utilizados.

$$PTA = \sum_{n=0}^n (PCI_n * BR_n) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde el PCI se calcula de acuerdo a la ecuación reportada por Tec y colaboradores (Tec, Leach, & Gowen, 1987). Ver Ecuación 3.

$$PCI_{\text{neto}} [MJ/kg] = PCS [MJ/kg] - 1,3 - \left(\frac{HUMEDAD}{100}\right) (PCS [MJ/kg] + 1,1) \quad (\text{Ec. 3})$$

1.2. Tecnologías de generación con Biomasa

Existen tres tecnologías principales, diferenciadas, para la generación de energía eléctrica utilizando BR: las térmicas y las biotecnológicas (Figura 2).

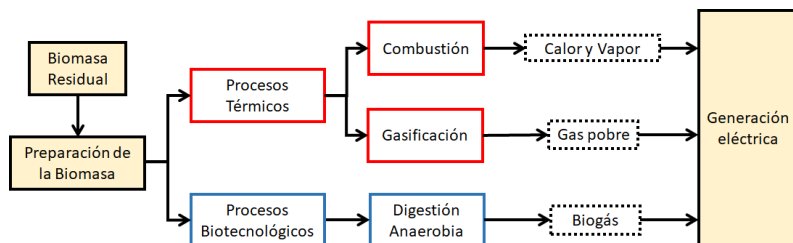


Figura 2. Esquema general de tecnologías de generación eléctrica con biomasa

Procesos térmicos: Dentro de la tecnología termica se encuentra la combustión y la gasificación. La combustión directa es la reacción estequiométrica de la materia orgánica con el oxígeno de aire en exceso y la gasificación se produce cuando la oxidación se realiza en defecto de oxígeno, el proceso utiliza aproximadamente la mitad de oxígeno estequiometrico necesario para la combustión completa; obteniendo monóxido de carbono e hidrógeno, conocidos como gas de síntesis o Syngas.

-COMBUSTIÓN: Es el más común y su eficiencia es relativamente baja, pero puede ser mejorada si además de producir electricidad, se recupera el calor residual para cogeneración (Combined Heat and Power - CHP). En la actualidad es la única tecnología desarrollada para la producción de calor y electricidad con biomasa sólida; esta se basa en ciclos rankine de caldera-turbina de vapor y el calor residual de la turbina es utilizado en aplicaciones de cogeneración, empleándose el calor residual tanto en el sector industrial, como en el doméstico (en centrales de distrito) (Carrasco , 2008). Con la cogeneración se ha demostrado que para las instalaciones del rango de 10 MWe se puede reducir el costo de producción de energía entre un 40- 60% (CORPOEMA, 2010).

-GASIFICACIÓN: La gasificación, es el proceso mediante el cual se somete la biomasa a una combustión parcial a temperaturas entre 700 y 1100 °C; este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas distintas: el secado, la pirólisis, oxidación o combustión y reducción. El proceso de gasificación está influenciado por dos parámetros del proceso: las propiedades de la biomasa, y el diseño del generador de gas (eficiencia). La gasificación es particularmente importante para generar electricidad en plantas de pequeña escala, menor que 5 - 10 MWe, donde los sistemas de gasificación son relativamente simples y se pueden combinar con motores de gas. A estos tamaños los sistemas basados en vapor se encuentran en desventaja por las economías de escala.

Procesos Biotecnológicos: Por otro lado, en los procesos biotecnológicos se tiene la digestión anaeróbica (DA) que degrada la biomasa residual biodegradable húmeda (como el estiércol de los animales, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos agrícolas húmedos y la fracción orgánica de los RSU) que tiene un contenido de humedad mayor al 60%. En la DA la biomasa se somete a un proceso de degradación con el uso de microorganismos, en ausencia de oxígeno, que producen un gas que contiene metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros, al cual se le denomina biogás. El proceso se realiza en varias etapas: hidrólisis, acidólisis y metanogénesis o etapa de producción de metano. Un 1 m³ de biogás sustituye a: 0,58 litros de Kerosén, 0,5 – 1,5 kg de leña, 0,61 litros de gasolina, 0,74 kg de carbón vegetal (Carrasco , 2008). En la Tabla 2 se muestra la producción promedio de excreta y de biogás por animal en un día.

Tabla 2. Producción de biogás a partir de residuos pecuarios (Fuente: adaptado de Emison, s.f.)

Origen	kg de excreta por día/animal	m ³ biogás/día
Vacas	15	0,6
Terneros	4	0,16
Caballos	15	0,6
Cerdos	1,5	0,1
Gallinas	0,15	0,009

2. Plantilla de cálculo para generación con biomasa

El objetivo es obtener una herramienta (plantilla) que facilite los cálculos de la cantidad de energía eléctrica (kWh) y la potencia eléctrica (kW) para las tecnologías de combustión, gasificación y digestión anaeróbica utilizando biomasa.

Inicialmente se requiere conocer la cantidad de biomasa disponible para ser utilizada en generación; este dato se puede obtener por medio de la multiplicación del área de siembra por la densidad de siembra o por la cantidad de biomasa residual almacenada. Adicionalmente hay que tener en cuenta el tipo de biomasa a utilizar, su caracterización fisicoquímica, la tecnología de generación que se utilizará (con su eficiencia) y el número de horas de operación de la planta.

2.1 Cálculo para casos de generación térmica: combustión y gasificación.

El cálculo de la cantidad de energía y la potencia para un generador que utiliza BR necesita los siguientes datos de ingreso:

- a. Cantidad de Biomasa residual (BR) disponible al año que se utilizará en el proceso de generación (kg/año).
- b. Poder calorífico superior de la BR utilizada (en MJ/kg) extraída de la bibliografía o análisis de laboratorio -recordando que el poder calorífico aprovechable depende de la humedad de la BR utilizada, el dato real que se utilizará es el PCI-
- c. Porcentaje de humedad de la BR utilizada.
- d. Horas de operación de la planta al año.
- e. Eficiencia del sistema de generación (caldera y generador de vapor) dependiendo del caso -dado por el constructor de los equipos o la normatividad de cada país-

- **CASO 1: combustión**

Para efectos prácticos del ejercicio se supone que en alguna zona rural se disponen de 280.000 kg de biomasa residual por año, que tiene un poder calorífico superior de 20 MJ/kg, y una humedad del 50%. Se conoce que estos residuos están destinados a producir energía por medio de combustión, que el sistema de generación tiene una eficiencia del 20% y opera 6000 horas al año.

Con estos datos, el primer paso será calcular el poder calorífico Inferior (PCI) en [MJ/kg] de la BR por medio de la Ecuación 3. Esto en una plantilla de excel se organiza de la siguiente manera (Figura 3); las celdas que se encuentran en color amarillo son aquellas donde se insertan los datos, por lo cual estas celdas se pueden modificar de acuerdo a las cantidades y características de la BR utilizada.

C10		= (C4) * (1,3) - (((C5) / (100)) * (C4 + 1,1))	
A	B	C	D
1			
2	DATOS DE INGRESO		
3	Cantidad de BR (kg/año)	280000	
4	PCS (MJ/kg)	20	
5	Humedad (%)	50	
6	Horas de operación (h/año)	6000	
7	EFICIENCIA (%)	20	
8			
9	ENCONTRAR EL PCI (DEPENDE %H)		
10	PCI (MJ/kg)	8,15	
11			

Figura 3. Formulación del PCI en la plantilla en Excel (Fuente: elaboración propia)

Luego de calcular el PCI se procede a encontrar la cantidad de energía (en kWh/año) que se puede obtener utilizando la cantidad de biomasa -que para efectos del presente ejemplo es de 280.000 kg/año-, esto se realiza por medio de la Ecuación 4.

$$\text{Energía [kWh/año]} = \text{Biomasa (kg/año)} * \text{PCI} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \text{ MJ}} \right) * \frac{\text{eficiencia}}{100} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior en MJ/kg, por lo que se le aplica el factor de 3,6 MJ=1 kWh y el valor de la eficiencia (sin porcentaje) se divide en 100. En la Figura 4 se muestra el cálculo de la energía en la plantilla.

C13		= (C3) * (C10) * (1 / (3,6)) * (C7 / 100)	
A	B	C	D
1			
2	DATOS DE INGRESO		
3	Cantidad de BR (kg/año)	280000	
4	PCS (MJ/kg)	20	
5	Humedad (%)	50	
6	Horas de operación (h/año)	6000	
7	EFICIENCIA (%)	20	
8			
9	ENCONTRAR EL PCI (DEPENDE %H)		
10	PCI (MJ/kg)	8,15	
11			
12	CALCULO DE LA ENERGÍA ELECTRICA (kWh/año)		
13	Energía electrica (kWh/año)	126777,8	
14			

Figura 4. Formulación del cálculo de la energía eléctrica en la plantilla de Excel (Fuente: elaboración propia).

Y finalmente para el cálculo de la potencia en kW sería:

$$Potencia (kW) = \frac{Energía (kWh/año)}{Horas de operación (h/año)} \quad (Ec. 5)$$

Por lo tanto, en la plantilla se formula de la siguiente manera (Figura 5):

C16		f_x = =C13/C6	
A	B	C	D
1			
2	DATOS DE INGRESO		
3	Cantidad de BR (kg/año)	280000	
4	PCS (MJ/kg)	20	
5	Humedad (%)	50	
6	Horas de operación (h/año)	6000	
7	EFICIENCIA (%)	20	
8			
9	ENCONTRAR EL PCI (DEPENDEN %H)		
10	PCI (MJ/kg)	8,15	
11			
12	CALCULO DE LA ENERGÍA ELECTRICA (kWh/año)		
13	Energía electrica (kWh/año)	126777,8	
14			
15	CALCULO DE LA POTENCIA (kW/año)		
16	Energía electrica (kWh)	21,1	
17			

Figura 5. Formulación en Excel de la Energía eléctrica. (Fuente: elaboración propia)

- **CASO 2: Gasificación**

Se tiene la misma biomasa que en el Caso 1: 280.000 kg de biomasa residual por año con PCS de 20 MJ/kg, humedad del 50% y la planta opera 6000 horas al año. En este caso esta biomasa será utilizada en un proceso de gasificación que tiene una eficiencia global del 12%²; de acuerdo a esto el único dato que se modifica es la eficiencia (celda C7) obteniendo la energía y la potencia mostradas en la Figura 6.

² Si bien la eficiencia de la gasificación puede ser mucho mayor, la eficiencia global disminuye debido a los procesos de mantenimiento y limpieza de la planta.

	A	B	C	D
1				
2		DATOS DE INGRESO		
3		Cantidad de BR (kg/año)	280000	
4		PCS (MJ/kg)	20	
5		Humedad (%)	50	
6		Horas de operación (h/año)	6000	
7		EFICIENCIA (%)	12	
8				
9		ENCONTRAR EL PCI (DEPENDE %H)		
10		PCI (MJ/kg)	8,15	
11				
12		CALCULO DE LA ENERGÍA ELECTRICA (kWh/año)		
13		Energía electrica (kWh/año)	76066,7	
14				
15		CALCULO DE LA POTENCIA (kW/año)		
16		Energía electrica (kWh)	12,7	

Figura 6. Ejemplo caso 2 – Gasificación. (Fuente: elaboración propia)

4.2 Cálculos para el proceso de Digestión Anaerobia (DA)

La calidad del biogás que se obtiene depende de la cantidad de metano que contenga y este, a su vez, de la biomasa residual utilizada para su producción. En la Tabla 3 se muestran las biomásas más utilizadas para producción de Biogás con la cantidad promedio de biogás que genera por medio de DA.

Tabla 3. Cantidad de biogás promedio generado a partir de diferentes biomásas residuales (Fuente: adaptado de Emison, s.f.)

SUSTRATO	Promedio (L/Kg. Biomasa seca)	kWhe promedio/kg
Excreta de Porcino	450	0,765
Excreta de vacuno	250	0,425
Excreta de Aves	460	0,782
Guano de caballo	250	0,425
Guano de establo	225	0,3825
Paja de cereales	250	0,425
Paja de maíz	410	0,697
Paja de arroz	220	0,374
Gras fresco	410	0,697
Bagazo	160	0,272
Desperdicios de verduras	350	0,595
Desperdicio de frutas	384	0,652
Lodos de aguas residuales	450	0,765

El poder calorífico medio del biogás varía entre 21 y 23,5 MJ/m³ y 1m³ de biogás equivale a un contenido energético de 6 kWh, con una eficiencia promedio de

conversión a energía eléctrica del 28,3%. A su vez, 1m³ de biogás se convierte en aproximadamente 1,7 kWh e el resto de la energía se pierde en forma de calor. (Dimpl, 2010b) Teniendo en cuenta lo anterior, se suponen los siguientes casos de estudio:

- **CASO 3: Energía y potencia a partir de biogás obtenido de residuos agroindustriales**

Para efectos del presente ejemplo, se tienen 396.000 kg/año de lodos de aguas residuales procedentes de una industria agrícola. La planta de biogás opera 1000 horas/año. ¿Cuál es la energía y la potencia para esta planta?. El cálculo de la cantidad de energía y la potencia para un proceso de DA necesita los siguientes datos de ingreso: (Figura 7)

- Tipo de Biomasa que se va a utilizar en DA.
- Cantidad de Biomasa Residual al año que se utilizará en el proceso de generación (kg/año).
- Horas de operación de la planta al año (h/año).
- Producción promedio de biogás (L/kg BR) que posteriormente se transformará en m³/kg BR como se muestra en la Figura 7 – Este dato se extrae de la Tabla 3 o de bibliografía-.

DATOS DE INGRESO	
Tipo de Biomasa	Lodos de Aguas Residuales
Cantidad de BR (kg/año)	396000
Horas de operación (h/año)	1000
Produccion promedio de Biogás (L/kg BR)	450
Produccion promedio de Biogás (m3/kg BR)	0,45

Figura 7. Datos requeridos para el caso 3 (Fuente: elaboración propia)

Posteriormente se procede a calcular la cantidad de biogás producido por año con esta cantidad de BR de acuerdo a la Ecuación 6, donde CantBiogás es la cantidad de biogas en m³/año, CantBR es la cantidad de biomasa residual al año en kg/año y PPB es la producción promedio de biogás en m³/año.

$$CantBiogás \left(\frac{m^3}{año} \right) = CantBR \left(\frac{kg}{año} \right) * PPB \left(\frac{m^3}{kg} \right) \quad (Ec. 6)$$

Esto, se formula en Excel de acuerdo a la Figura 8:

	A	B	C	D	E
1					
2					
3			DATOS DE INGRESO		
4			Tipo de Biomasa	Lodos de Aguas Residuales	
5			Cantidad de BR (kg/año)	396000	
6			Horas de operación (h/año)	1000	
7			Produccion promedio de Biogás (L/kg BR)	450	
8			Produccion promedio de Biogás (m3/kg BR)	0,45	
9					
10			CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE BIOGÁS (m3/año)		
11			Cantidad de Biogás (m3/año)	178200	
12					

Figura 8. Cálculo de la cantidad de biogás para el caso 3 (Fuente: elaboración propia)

Para el cálculo de la energía eléctrica se utiliza el factor $1\text{m}^3 = 6\text{ kWh} = 1,7\text{ kWhc}$; por tanto se realiza de acuerdo a la Ecuación 7.

$$\text{Energía} \left(\frac{\text{kWhc}}{\text{año}} \right) = \text{Cantidad Biogás} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) * \frac{1,7\text{ kWhc}}{1\text{m}^3} \quad (\text{Ec. 7})$$

Finalmente se calcula la potencia de la misma manera que en las tecnologías térmicas (Ecuación 5). La formulación de la energía eléctrica y el cálculo de la potencia se aprecian en la Figura 9.

	A	B	C	D	E
7			Produccion promedio de Biogás (L/kg BR)	450	
8			Produccion promedio de Biogás (m3/kg BR)	0,45	
9					
10			CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE BIOGÁS (m3/año)		
11			Cantidad de Biogás (m3/año)	178200	
12					
13			$1\text{m}^3 = 6\text{ kWh} = 1,7\text{ kWhc}$		
14			FACTORES PARA REGLA DE 3		
15					
16			CÁLCULO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA (kWh/año)		
17			Energía eléctrica generada (kWh/año)	302940	
18					
19			CÁLCULO DE LA POTENCIA (kW/año)		
20			Energía eléctrica generada (kWh/año)	302,94	
21					

Figura 9. Formulación de la energía eléctrica generada y cálculo de la potencia. (Fuente: elaboración propia)

- **CASO 4: Energía y potencia a partir de biogás obtenido de residuos de animales en una granja rural**

Un campesino quiere generar biogás y posee 35 gallinas, 3 vacas y 4 cerdos ¿Qué energía y potencia puede lograr si el campesino operaría la planta de biogás 1000 horas/año?, es decir, que la planta operaría aproximadamente 3 horas al día.

El cálculo de la cantidad de energía y la potencia para este caso necesita los siguientes datos de entrada: (Figura 10)

- Animal que genera residuos a utilizar (animal 1, animal 2, animal 3, animal)
- Número de animales que se tienen y generan residuos
- Cantidad de biogás que produce un animal por día – CBA (m³ biogás/día) –Este dato se extrae de la Tabla 2 o de bibliografía-
- Horas de operación de la planta al año (h/año).

DATOS DE INGRESO	
Animal 1	Gallinas
Número de animales 1	35
Cantidad de biogas que produce un animal 1 por día (m3 biogás/día)	0,009
Animal 2	Vacas
Número de animales 2	3
Cantidad de biogas que produce un animal 2 por día (m3 biogás/día)	0,6
Animal 3	Cerdos
Número de animales 3	4
Cantidad de biogas que produce un animal 3 por día (m3 biogás/día)	0,1
Horas de operación al año (h/año)	1000

Figura 10. Datos de ingreso para el Caso 4. (Fuente: elaboración propia)

Se procede a calcular la cantidad de biogás que se producirá en un año, para ello inicialmente se encuentra la cantidad de biogás que produce cada tipo de animal en un día (Ecuación 8), donde CBA es la Cantidad de biogás que produce un animal por día. Posteriormente se procede a encontrar el total de biogás por año realizando la suma de la cantidad de biogás por cada tipo de animal multiplicado por 360 días para obtener el dato por año (m³ biogás/año), como se muestra en la Figura 11.

$$\text{Cantidad de biogás por animal} \left(\frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \right) = \text{CBA} * \# \text{ animales} \quad (\text{Ec. 8})$$

D42		= (D39+D40+D41)*360	
A	B	C	D
34		Número de animales 3	4
35		Cantidad de biogas que produce un animal 3 por día (m3 biogás/día)	0,1
36		Horas de operación al año (h/año)	1000
37		CALCULO DE CANTIDAD DE BIOGÁS POR TIPO DE ANIMAL	
38			
39		Animal 1 (m3 biogás/día)	0,315
40		Animal 2 (m3 biogás/día)	1,8
41		Animal 3 (m3 biogás/día)	0,4
42		TOTAL BIOGÁS ANUAL (m3 biogás/año)	905,4
43			

Figura 11. Formulación en Excel para encontrar la cantidad de biogás total al año. (Fuente: elaboración propia)

Finalmente se calcula la cantidad de energía y la potencia de acuerdo a las Ecuaciones 7 y 5 respectivamente. En la Figura 12 se pueden observar estos cálculos en la plantilla.

D51		=D48/D36	
A	B	C	D
36		Horas de operación al año (h/año)	1000
37		CALCULO DE CANTIDAD DE BIOGÁS POR TIPO DE ANIMAL	
38			
39		Animal 1 (m3 biogás/día)	0,315
40		Animal 2 (m3 biogás/día)	1,8
41		Animal 3 (m3 biogás/día)	0,4
42		TOTAL BIOGÁS ANUAL (m3 biogás/año)	905,4
43			
44		$1m^3 = 6kWh = 1,7 kWh_e$	
45		FACTORES PARA REGLA DE 3	
46		CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA	
47		Energía eléctrica generada (kWh/año)	1539,18
48			
49		CÁLCULO DE LA POTENCIA (kW/año)	
50		Energía eléctrica generada (kWh/año)	1,54
51			
52			

Figura 12. Energía y potencia para el caso. (Fuente: elaboración propia)

3. Análisis y discusión

En la actualidad los gobiernos incentivan, con ayudas económicas o tributarias, la utilización de la biomasa residual ya que con ella se evitan emisiones de GEI al reemplazar combustibles fósiles. Para estimar dichos incentivos es importante estimar previamente la posible disminución de GEI y así cumplir con los compromisos adquiridos por los países para el año 2050.

En el marco del objetivo anterior, se presentó una herramienta de cálculo en Excel que sirve para estimar el potencial energético aprovechable para la generación, tanto de energía térmica como eléctrica que se puede obtener conociendo la cantidad de biomasa disponible y utilizando datos de entrada como poder calorífico superior -disponible en bibliografía-, la humedad residual determinada por análisis de laboratorio sin necesidad de instrumentos de alto valor y la eficiencia de los equipos ofrecidos. Así, por ejemplo, si hay una oferta de una planta con una determinada eficiencia suministrada por el vendedor se puede simular el tamaño de la planta dependiendo del tiempo de operación en el año (factor de operación).

En una granja agrícola la producción y cosecha de cultivos es estacionaria y las necesidades energéticas son igualmente dependientes de la época y por lo tanto con la herramienta se puede optimizar el tamaño de la planta dependiendo de las necesidades energéticas de la cosecha o post cosecha. También se puede estimar la posible humedad de la biomasa con el fin de determinar el gasto energético del secado y su posible costo (para tecnologías térmicas). La plantilla es útil para estimar la cantidad de biomasa que se debe almacenar en épocas de necesidades críticas y su posible área de almacenamiento.

En el campo, el biogás se puede utilizar como combustible seguro a cambio de la leña evitando problemas ambientales durante la cocción de alimentos y enfermedades pulmonares causadas por los humos y el material particulado. La plantilla puede calcular la energía producida por el biogás obtenido utilizando biomasa biodegradable disponible, de tal suerte que se puede calcular la energía y la potencia procedentes del uso de residuos de animales y/o agrícolas, o dependiendo de las necesidades energéticas, calcular el número de animales necesarios para sustentabilidad energética de la granja.

Referencias

- Carrasco, J. (2008). Modulo: Biomasa. Recuperado el julio de 2021, de Combustión directa de la biomasa: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20204/combustion-directa-de-la-biomasa>
- Corpoema. (2010). Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE). Obtenido de http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf
- Dimpl, E. (2010). Small-scale Electricity Generation from Biomass - Part II: Biogas. GTZ-HERA – Poverty-oriented Basic Energy Service.

-
- Emison. (s.f.). Biogás en Ganadería. Recuperado el julio de 2021, de <https://www.emison.com/biogas%20ganaderia.htm>
- IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C - An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C. Obtenido de above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- Pérez Bayer, J. F., & Osorio Vélez, L. F. (2014). Biomasa forestal como alternativa energética. Análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Rincon J.M., Gastón R., Islas J.M.,Lizarde J.E. (2014). Potencial de la biomasa y perspectivas en diferentes países. En R. M. Electo (Ed.), Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.

SECCIÓN II:

**APLICACIONES Y MÉTODOS
DE EVALUACIÓN
DE SUSTENTABILIDAD DE
LA BIOMASA**



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Sección II, 2021: 115-117
ISBN: 978-84-15413-40-0

II. APLICACIONES Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD DE LA BIOMASA

María Luisa Ojeda¹ y Silvina M Manrique²

¹ *Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile*

² *Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439.*

Introducción a la Sección II

En la presentación de los respectivos Aportes a las Contribuciones Nacionales (INDC por sus siglas en inglés), en las últimas Conferencias de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP), se ha visto en forma reiterada, que las energías limpias serán fundamentales en la reducción de emisiones para todos los gobiernos. Entre ellas, en particular es importante destacar una tecnología de energía renovable, muchas veces infrutilizada, que es la bioenergía obtenida a partir de fuentes sostenibles de biomasa (BID, 2020).

Según Jiménez et al. (2020), la bioenergía posee un importante aporte al suministro de energía primaria siendo el mayor participante en la oferta mundial con respecto a otras fuentes renovables. Para el 2015 la biomasa aportaba el 14,1% en el consumo final de energía, evidenciando desde el año 2010 un crecimiento del 2% anual en la generación eléctrica (Douglas, 2018). Sin embargo, la selección de la tecnología para la conversión de la biomasa en energía es una decisión compleja e involucra muchos factores, como la calidad y la cantidad de biomasa, factores sociales, medioambientales, tecnológicos, y económicos (Qazi et al., 2018).

CEPAL (2008) reconoce cinco cualidades positivas de la biomasa, que justifican su definición como energía sostenible: (i) no agota los recursos naturales al usar

residuos: presenta una oportunidad única para la valorización energética de desechos forestales y agrícolas en las pequeñas empresas, en procesos térmicos como la combustión, u otros, para la generación de vapor y electricidad, hoy en día reconocidas como acciones de economía circular; (ii) es fácil de cultivar, recolectar y utilizar: las actividades agrícolas y forestales son propensas a generar grandes cantidades de residuos de biomasa que a menudo se quedan en el campo. Mediante la utilización de este tipo de residuos para producir energía sin causar daños a la tierra, los costos de desecho de materiales y los niveles de contaminación pueden ser disminuidos; (iii) ayuda a reducir las emisiones de CO₂: quemar residuos agrícolas para generar electricidad libera materia orgánica que se habría liberado de forma natural a través del periodo de descomposición, que cuando es anaeróbica, implica 20 veces más emisiones de gases de efecto invernadero; (iv) puede beneficiar directamente a zonas rurales: la biomasa puede fomentar inversiones en zonas rurales y generar empleo en toda la cadena de suministro; (v) es un mercado poco explorado con un potencial de crecimiento enorme. La biomasa puede representar el orden de 100 EJ, en un escenario de carbono neutralidad tendiente a cero emisiones en el 2050 (Gul et al., en AIE, 2020).

Sin embargo, la biomasa puede ser producida en un modo insostenible ambientalmente, como por ejemplo, por la cosecha de leña desde bosques nativos sin un plan de manejo; por transformar los bosques en tierras agrícolas (Vijay et al., 2016); por producirla a partir de métodos agrícolas con impactos negativos (altos insumos de fertilizantes y pesticidas, mal manejo del agua, sin prácticas de sistematización y protección de suelos) (Berndes, 2002). Por otro lado, el comercio de biomasa debería motorizar la economía local, aunque existen ejemplos a nivel mundial de que sólo quedan los impactos negativos de la exportación de biomasa, y la situación de pobreza y desigualdad local se agrava (Santika, et al. 2019). Asimismo, el uso de la biomasa en sectores rurales y economías emergentes para cocinar y calentar, utilizando fuegos abiertos ineficientes, tiene impactos en la salud humana y el medio ambiente (AIE, 2020). Por último, el supuesto de neutralidad de emisiones de carbono de un sistema de bioenergía, no siempre se cumple. La diferencia en las estimaciones mundiales, no solo tienen que ver con la escala en la que se enfocan sus estudios o los límites considerados en los análisis, sino también con el tipo de recurso de biomasa que se considere, la manera en que se maneje el recurso y el destino final de la energía generada.

Lo anteriormente expuesto coloca en una posición relevante a la biomasa como recurso energético, frente a los futuros requerimientos hacia la carbono neutralidad, pero también condiciona grandes desafíos asociados al recambio tecnológico, y en especial a la sostenibilidad ambiental del recurso, siendo necesaria su evaluación a lo largo de toda la cadena productiva, y sus aplicaciones.

Estudios de caso incluidos en esta Sección

A continuación se incluyen 4 casos en esta Sección. En el CASO V se realiza un análisis de los impactos ambientales reales de la explotación de la biomasa

lignocelulósica en Chile, y sus efectos sobre el cambio climático, suelo y ecotoxicidad, como consecuencia del tipo de cultivo y tecnología de conversión seleccionada. En el CASO VI se presenta una segunda etapa, del caso anterior, esta vez, aplicado la tecnología de ACV (Análisis de Ciclo de Vida) para realizar un análisis sistémico de la sustentabilidad del aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos, y evaluar así sus impactos al medio ambiente, con la revisión de un caso de aplicación. En el CASO VII, se evalúa la producción de Paja Canalera (*Saccharum spontaneum* L.) carbonizada, por medio de la utilización de un gasificador de lecho fijo y flujo ascendente, y su posterior aplicación en procesos de descontaminación de efluentes industriales con presencia de metales pesados, presentando así una alternativa de uso de la biomasa con fines medioambientales. Finalmente en el CASO VIII, se desarrolla un análisis ambiental, principalmente sobre las emisiones gaseosas, producto de la utilización de biocombustibles, tipo biodiesel, elaborados a partir de residuos de la industria, en motor de combustión interna pequeña escala.

Referencias

- AIE (2020), Agencia Internacional de Energía, visitada 01 de Julio de 2021: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>.
- Berndes, G. (2002). Bioenergy and water-the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change* 12, 253–271.
- BID (2020), Invest. 5 razones para reconsiderar la biomasa en Latinoamérica. Matos Tudela V., recuperado de: <https://idbinvest.org/es/blog/energia/5-razones-para-reconsiderar-la-biomasa-en-latinoamerica> (11 de Julio de 2021).
- CEPAL (2008), Aporte de los biocombustibles a la sustentabilidad del desarrollo en América Latina y el Caribe: Elementos para la formulación de políticas públicas, elaborado por Pistonesi H., Nadal G., Bravo V., y Bouille D.
- Douglas, B., (2018), *Renewables 2017 Global Status Report*. (Ponencia). Sustainable Energy Forum. La Habana, Cuba.
- Gul, T., Cozz,i L., y Havlik, P., (2021),¿Qué significan emisiones netas cero para 2050 para la bioenergía y el uso de la tierra?, Recuperado de: <https://www.iea.org/articles/what-does-net-zero-emissions-by-2050-mean-for-bioenergy-and-land-use>. (junio 2021).
- Jiménez R., López E., Bravo E., Álvarez A., y Hernández M., (2020), Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método AHP, *Revista Universidad y Sociedad*, versión On-line ISSN 2218-3620, Vol. 12 N°1.
- Qazi, W. A., Abushammala, M. F. M., & Azam, M. H. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Management & Research*, 36(7), 594-605.
- Vijay V, Pimm SL, Jenkins CN, Smith SJ. 2016. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *PLoS One* 11 (7), e0159668.
- Santika, T. et al. 2019. Does oil palm agriculture help alleviate poverty? A multidimensional counterfactual assessment of oil palm development in Indonesia. *World Dev.* 120: 105–117.

CASO VI. Impactos ambientales asociados al aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos: Parte I: Tecnologías y antecedentes

Yannay Casas Ledón^{1,2} Mauricio Flores²
Mabel Vega³, Maray Ortega⁴, Luis E. Arteaga Pérez^{2,4}

¹Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad Ciencias Ambientales-Centro EULA, Universidad de Concepción, Concepción, 4030000, Chile

²Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Concepción, 4030000, Chile

³Departamento Ing. En Maderas, Universidad del Bio-Bio, Concepción, 4030000, Chile

⁴Laboratorio de Proceso Térmicos y Catalíticos (LPTC-UBB), Universidad del Bio-Bio, Concepción, 4030000, Chile

Resumen. La biomasa forestal juega un papel fundamental para las nuevas políticas energéticas latinoamericanas, donde este recurso se reconoce como un actor importante para reconvertir las matrices eléctricas en otras menos centralizadas, más eficientes y sostenibles. Sin embargo, dicha transformación debe ir acompañada de la aplicación de metodologías que permitan cuantificar los impactos reales, que a nivel ambiental, tiene la explotación de la biomasa lignocelulósica. Según los resultados de este capítulo, latinoamerica, en particular Chile, tiene enorme potencial para el uso de la biomasa con fines energéticos. Sin embargo, debe prestarse especial interés a los efectos que tienen las etapas de cultivo de la biomasa, y las tecnologías conversión usadas sobre el cambio climático, el uso de suelo y la ecotoxicidad. En la segunda parte de este capítulo se presentan los aspectos metodológicos y un caso de estudio representativo, que valida los elementos aquí destacados.

*Correspondencia: Luis E. Arteaga Pérez, E-mail: larteaga@ubiobio.cl

1. Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo ofrecer antecedentes sobre el aprovechamiento energético de biomasa lignocelulósica en Chile, con una mirada ambiental. Por tanto, su alcance es generalizador e incluye aspectos técnicos, económicos y ambientales, asociados a las tecnologías de transformación de biomasa lignocelulósica en combustibles, calor y electricidad. El capítulo parte de una mirada regional y termina con el caso particular de Chile. Asimismo, se ofrece una revisión actualizada de la literatura relacionada con el uso de las herramientas de análisis de sustentabilidad aplicadas a estas tecnologías. Finalmente, se identifican aquellos aspectos críticos y los elementos que, estratégicamente, deben incluirse en un análisis de ciclo de vida aplicado al uso de la biomasa para aplicaciones energéticas.

1.1. Panorama sudamericano del uso de biomasa lignocelulósica para la producción de energía

Se entiende por biomasa lignocelulósica a toda materia orgánica renovable de origen vegetal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial, y los residuos generados en su producción y consumo. Como ejemplo cabe citar: residuos agrícolas de la industria agroalimentaria, productos, subproductos y residuos forestales, residuos de la industria primaria y secundaria de la madera, subproductos y residuos de la industria de la celulosa y del papel, y cualquier tipo de biomasa cultivada para fines energéticos. A partir de las distintas fuentes que comprenden la biomasa es posible producir energía calórica o eléctrica (bioenergía) que colaboran en la sostenibilidad de las distintas matrices productivas de cada país. En tal sentido, la región sudamericana presenta distintas ventajas que propician ciertos tipos de biomasa, referidas a las extensiones de tierra disponibles, climas, cultivos agrícolas, tipos de agroindustria desarrolladas o actividad forestal y su vinculación con la población de dicho país. Así por ejemplo, en zonas ecuatoriales como Ecuador, Colombia o Venezuela destacan el cultivo de palma, en sectores como Brasil y Argentina destacan los cultivos de caña de azúcar, soya y trigo, y más al sur, fundamentalmente la industria forestal encabezada por Chile. Según recientes estudios (Magalhães Jr. et al. 2019), se estima que, en la región, la producción de residuos agroindustriales alcanzará un total de 895,7 millones de toneladas al 2025 lo que equivale a alrededor de 4.031 TWh. En el caso particular de Chile, donde la industria forestal está altamente desarrollada, según (Berg et al. 2013) se supone un potencial teórico máximo de alrededor de 4 millones de toneladas en base seca equivalentes a 21.000 GWh aproximadamente.

1.2. Residuos Forestales en Chile

Según INFOR (Gysling et al. 2019), el recurso forestal (plantaciones forestales y bosque nativo) cubre 17,9 millones de hectáreas, lo que representa el 23,7% de la superficie nacional. Más del 90% del recurso forestal se localiza entre la Región del Maule y Magallanes, correspondiendo fundamentalmente a bosque nativo con un 81,3% de la superficie, plantaciones forestales (17,6%) y la diferencia corresponde

a bosque mixto. Las plantaciones forestales de pino radiata cubren la mayor parte de esta superficie, con el 56%, seguidas por plantaciones de eucaliptos con el 38%, donde destacan dos especies, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. Las actividades de manejo forestal están estrechamente relacionadas con el nivel de actividad de la industria forestal, más del 95% de la materia prima industrial que se procesa en Chile proviene de las plantaciones. Se estima que, para el actual nivel de producción en Chile, se cosechan más de 100 mil hectáreas anuales, estando altamente concentradas en los grupos Arauco y CMPC. El bosque nativo provee una pequeña parte del procesamiento industrial y una cuantiosa cantidad que se expresa en el suministro de leña para uso domiciliario y de algunas industrias menores.

Numerosos esfuerzos ha realizado el Estado a través de lo que fue la Comisión Nacional de Energía (CNE) y posteriormente el Ministerio de Energía y CONAF con ayuda de la GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Universidades y Centros Tecnológicos con la finalidad de prospeccionar la disponibilidad de biomasa forestal para uso energético. Destacan así los estudios de González et al. (2007) para residuos de la industria primaria del aserrío (96,9% de la producción nacional es de pino radiata), Bertrán and Morales (2008) respecto del manejo forestal de las especies de mayor importancia en Chile y los estudios de la Universidad Austral (2013) acerca del potencial uso energético derivados del manejo del bosque nativo (culminó con el montaje de una plataforma web: www.sit.conaf.cl) y finalmente superficies disponibles para plantaciones dendroenergéticas, ambos estudios encargados también por el Ministerio de Energía. Sin embargo, es complejo encontrar estudios que unifiquen criterios técnicos y ambientales, por cuanto sus metodologías difieren tanto en sus supuestos como en la forma final de expresar sus resultados. Sobre esto influyó que fue sólo con posterioridad al año 2013, que el Estado a través del Ministerio de Energía, planteó diferentes escalas de potenciales, desde el teórico pasando por el ecológico y técnico, hasta llegar al disponible. Dichas proyecciones incluyeron diferentes aspectos, como por ejemplo: restricciones geográficas impuestas por el hombre, restricciones técnicas de captación o de transformación del recurso, tipo de tecnología a utilizar para su aprovechamiento, así como otras barreras de aceptación de la población o políticas gubernamentales (Ojeda et al. 2020). Así, un esfuerzo sustantivo para unificar los distintos estudios, e incorporando residuos agrícolas lignificados de avena y trigo fue llevado a cabo por la Unidad de Desarrollo Tecnológico el 2013 (Berg et al. 2013). En esta misma senda, un segundo estudio realizado por la Universidad de La Frontera (UFRO 2014) ha permitido refinar los resultados reportados en los estudios anteriores acercando los potenciales a la realidad técnica, de ahí en más no se han ejecutado estudios técnicos que permitan actualizar la información hasta ahora catastrada.

En tal contexto, a partir de datos del INFOR (Gysling et al. 2019) y supuestos hechos por (Berg et al. 2013) y la Universidad de la Frontera (UFRO 2014), considerando como principales fuentes sólo los residuos derivados directamente de la actividad forestal, se tienen; residuos de aserraderos (lampazo, aserrín, viruta y corteza), manejo de plantaciones forestales (poda, raleo y cosecha) y manejo sustentable

del bosque nativo (despunte, ramas, copas, hojas). Luego, la Tabla 1 presenta en forma resumida, el potencial teórico-técnico disponible.

Tabla 1. Potencial Teórico-Técnico de biomasa forestal residual (base anual)

Tipo Biomasa	Potencial Teórico		Comentarios
	Mt base seca	Energía (GWh)	
Residuos industria primaria de aserrío (Berg et al. 2013; Gysling et al. 2019)	2.057 (55,4)	10.553 (0,2)	La mayor parte de los residuos se utilizan ya sea para autoconsumo o comercializa con fines energéticos resultando sólo alrededor de un 3% el disponible, de ahí que el potencial sea bajo
Residuos Manejo Forestal convencional (Berg et al. 2013)	1.792 (181)	10.278 (887)	Sólo considera a pequeños y medianos propietarios forestales, pues los grandes actores del mercado auto-consumen los residuos del manejo de sus bosques
Manejo sustentable Bosque Nativo (Berg et al. 2013)	12.946 (9.555)	70.833 (46.863)	Se usan más de 3 millones de toneladas como leña. Una limitación importante es el acceso al recurso con lo que el potencial técnico es difícil de conocer, por lo que éste debiese ser menor a lo aquí presentado
Total	16.795 (9.791)	91.664 (47.750)	

(): Potencial teórico restringido en GWh

Los residuos de aserraderos, si bien son cuantiosos, manteniéndose relativamente constantes a lo largo de los años se consumen en una alta proporción, por lo que el potencial de crecimiento es muy bajo (Berg et al. 2013; Gysling et al. 2019). Ya en 2013 se estimaba una disponibilidad del orden de un 10%, la que hoy sólo llega al 3% en vista del incremento de uso local. Si bien es cierto, la cosecha forestal aumenta año a año alcanzándose ya los 47 millones de m³ ssc (Gysling et al. 2019), la mayor parte de la superficie y producción forestal está concentrada en dos grandes grupos (CPMC y Arauco). Estos grupos empresariales abarcan más del 50%, utilizando los residuos generados en las cosechas de sus predios para autoconsumo en sus plantas de transformación. Según el análisis hecho por la Universidad de la

Frontera (UFRO 2014) el potencial teórico se reduce a la generación de residuos de pequeños y medianos productores forestales, según las cantidades reportadas por ellos. De acuerdo a lo que señala la Tabla 1, el mayor potencial teórico de biomasa forestal proviene del manejo sustentable del bosque nativo, que según el catastro realizado por la UACH el 2013, ocupaba una superficie bruta de 13,3 millones de hectáreas, con una superficie neta con potencial para manejo silvícola de 6,5 millones de hectáreas. Dicha superficie se traducía en aproximadamente 12,9 millones de toneladas secas al año o 70 mil GWh. Bajo un escenario más realista que incluyó la oferta por consumo de leña (principal uso de la biomasa de bosque nativo), según estimaciones de la Universidad de la Frontera (UFRO 2014) el potencial se reduciría en un 25%. Se debe considerar que los valores aquí reportados son cifras teóricas y potenciales, las cuales puede verse afectadas en mayor o menor medida por aspectos tales como; limitaciones de acceso, dispersión geográfica, reglamentación estatal y del tipo-socioeconómico.

Sin duda, la generación de energía a partir de residuos forestales convencionales (residuos de aserrío y manejo forestal) sigue siendo una buena alternativa, aunque el potencial va reduciéndose a lo largo de los años a medida que las empresas principalmente ligadas a la transformación de la biomasa forestal van integrando en sus procesos el uso de los residuos forestales para el autoabastecimiento de energía. El potencial más interesante aún está ligado al manejo del bosque nativo, pero como se ha mencionado existen varios aspectos aun no resueltos y que inhiben su explotación.

2. Estado de las tecnologías para aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos en Chile

2.1 Aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos en Chile. Disponibilidad.

El vertiginoso desarrollo de la industria forestal chilena, en conjunto con el establecimiento de producciones agrícolas (ej. Maíz y trigo) posicionan al país en una situación ventajosa para el aprovechamiento de materiales lignocelulósicos con fines energéticos. La evidencia empírica demuestra la existencia de un potencial técnico en el área de la bio-energía (2.129 MW) que está siendo sub-explotado, incluso en regiones donde el recurso lignocelulósico es abundante y su manejo eficiente (Bio-Bio, Araucanía, Los Ríos, etc.). Uno de los estudios pioneros en esta área fue presentado por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción (Berg et al. 2013) y complementado de manera parcial en el libro Recursos, Tecnologías, Transferencia y Políticas: Una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bio-energía en iberoamerica, publicado recientemente por la Red Iberoamericana CYTED Rebibir (Ojeda et al., 2020 en Manrique et al., 2020). Ambas fuentes de información ofrecen datos que demuestran que a pesar de que en Chile se han promovido políticas de desarrollo dirigidas a incrementar el uso de energías renovables, y desplazar a los combustibles fósiles de su matriz energética, la biomasa sigue estando relegada a un segundo plano (Ministerio de Energía 2020).

De acuerdo al último reporte de energías renovables (Nov. 2020), en Chile existe una capacidad instalada de generación eléctrica a partir de biomasa de 466 MW (incl. biogás). Asimismo, este reporte señala que existen 6 MW de potencia instalada en proyectos en periodo de pruebas, mientras que en construcción se encuentran 171 MW; además de contar con 15 MW en iniciativas que se ubican en la etapa de calificación. La mayor parte de las plantas que usan biomasa lignocelulósica se encuentra en las industrias de Celulosa y Papel (Figura 1), y están dedicadas prioritariamente a suplir las necesidades internas de calor y potencia, con un aporte neto estimado a la red de un 2-3% de la generación nacional (<http://generadoras.cl/tipos-energia/bioenergia>). Dichas instalaciones ocupan calderas de media y alta presión con sistemas de combustión en parrilla, y en algunos casos integradas a ciclos de vapor convencionales, mientras que en otras instalaciones menores, como los aserraderos (fundamentalmente los de media y alta capacidad), la biomasa se usa en calderas de bajo tonelaje para suplir necesidades locales de calor en sistemas de secado.

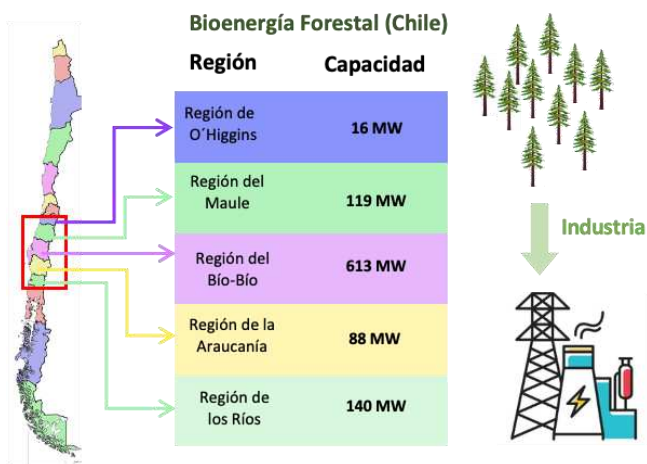


Figura 1. Potencia instalada de centrales de bioenergía forestal en Chile (Fuente: www.corma.cl.)

La carencia de una infraestructura tecnológica nacional o local para usar la biomasa lignocelulósica de forma intensiva, hace que la aplicación energética más difundida sea su uso en sistemas de calefacción doméstica, sobretudo en las regiones Centro-Sur del país. Según Rodrigo O'Ryan (presidente de la Asociación Chilena de Biomasa), el 96% de este combustible a nivel doméstico se usa en forma de leña en trozas, mientras que el 4% equivale al formato pellet. Sin embargo, al no estar regulado el mercado de la leña -se comercializa sin estándares de calidad-, su uso implica problemas ambientales de gran envergadura, especialmente en el período de in-

vierno (CORMA 2020). Un informe encargado por Greenpeace y AirVisual, que midió los niveles de contaminación por material particulado fino $PM_{2,5}$ posicionó a cinco comunas de Chile como las más contaminadas en Latinoamérica, en 2018.

Sobre la base de estos problemas se han trazado estrategias-país como por ejemplo: Proyectos de recambio de calefactores por otros de alta eficiencia (estufa certificada o estufa a pellets). Esto trajo beneficios ambientales cuya cuantificación indica que un calefactor antiguo a leña generaba $125,9 \text{ kg}_{MP_{2,5}}/\text{Vivienda-año}$, mientras que un dispositivo certificado llegaba a $30 \text{ kg}_{MP_{2,5}}/\text{Vivienda-año}$, y uno a pellet solo a $1,9 \text{ kg}_{MP_{2,5}}/\text{Vivienda-año}$ (Research 2020). Otra de las iniciativas que se ha manejado, pero que conlleva mayor nivel logístico, es el uso de sistemas distritales de calefacción asociados al manejo inteligente del recurso forestal. Los beneficios ambientales de estas alternativas se han validado a través de su impacto sobre las emisiones atmosféricas; sin embargo, no existe una base de información que considere la problemática con una visión holística, como es el caso de los estudios de ACV, Social-ACV, etc.

2.2 Aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos en Chile. Tecnologías.

La Figura 2 resume algunas de las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de residuos sólidos poliméricos (biomasa lignocelulósica, plásticos, neumáticos y mezclas) a nivel internacional y la interrelación entre estas. En adelante se realiza un análisis del posicionamiento de cada proceso termoquímico en el mercado chileno, enfatizando sobre las tecnologías y su potencial beneficio económico.

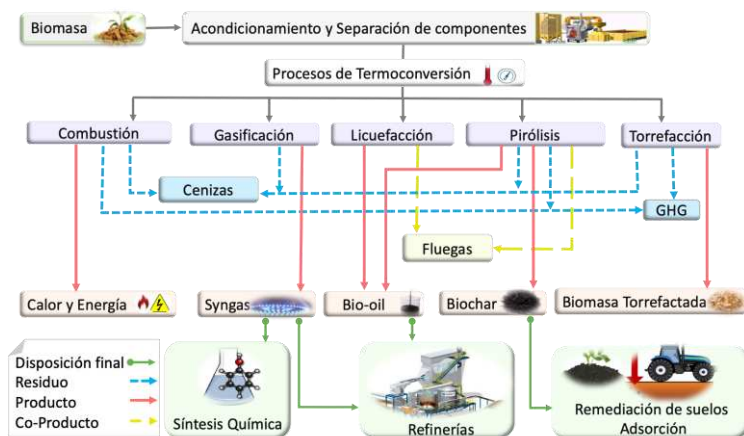


Figura 2. Procesos para el aprovechamiento termoquímico de la biomasa. (Fuente: elaboración propia).

En el año 2017 en Chile operaron 194 unidades astilladoras de las cuales 41 eran centrales y 153 eran astilladeros integrados a aserraderos de madera (procesa principalmente *Pinus radiata*). Las centrales de astillado concentran el 62% de la producción (app. 7.566.397 m³) siendo las instalaciones que dominan el mercado. Según INFOR (INFOR 2020), la producción de astillas en Chile se hace a partir de *Eucalyptus globulus* y *nitens* (86,6%) y, básicamente se comercializan libres de corteza. Por esta razón, el mercado de chips produce cerca de 11% v/v de residuos (finos y corteza) por cada m³ de biomasa procesada. A pesar de que las unidades de procesamiento de biomasa implican importantes intervenciones a los ecosistemas por concepto de cosecha (manual o mecánica), transporte, almacenamiento de materia prima, operación y distribución del producto (astillas), existen escasos reportes que cuantifiquen dichos impactos y permitan trazar estrategias de proceso más sustentables. Por estas razones, cualquier iniciativa que considere usar astillas de biomasa como materia prima, necesariamente tendría que incluir una evaluación de impactos, para la cual, los límites del sistema deben extenderse hasta las etapas de producción de la biomasa y su conversión a astillas.

- ***Tecnologías de pretratamiento: Producción de astillas y peletización***

Otra de las alternativas de pretratamiento que está llegando a capacidades interesantes, es la peletización. La producción de pellets creció sustancialmente después de la declaración de "Ciudades Saturadas" (MP₁₀ y MP_{2,5}). Se estima que la demanda en 2017 fue de 78 mil ton/año con un mercado concentrado entre las regiones del Maule y Los Lagos, siendo el mayor consumidor el sector residencial (75%), seguido del institucional (15%) y del industrial (10%). Incluso, se prevé que el mercado del pellet a 2025 crezca en un 300% abriendo así una interesante línea de negocios para productores que a la fecha venden el aserrín a precios irrisorios (AchBIOM 2017).

La peletización es una densificación energética de índole mecánico por lo que sus ventajas más importantes están en la estandarización del combustible y el beneficio implícito en la cadena logística de distribución. No obstante, cualquier tecnología energética basada en el uso de pellets, debe analizarse ambientalmente con un pensamiento de ciclo de vida.

- ***Tecnologías de conversión: Rutas termoquímicas***

En Ojeda et al. (2020), se ofrece una descripción detallada de las tecnologías para aprovechamiento térmico de biomasa lignocelulósica en Chile. Aquí, ofrecemos un breve resumen sobre los aspectos técnicos de estas tecnologías y su relación con los impactos ambientales más relevantes, a través de una mirada con enfoque en el pensamiento de ciclo de vida. En la Figura 3, se indica cual es el estado de avance de las tecnologías de termoconversión en el mercado energético chileno.

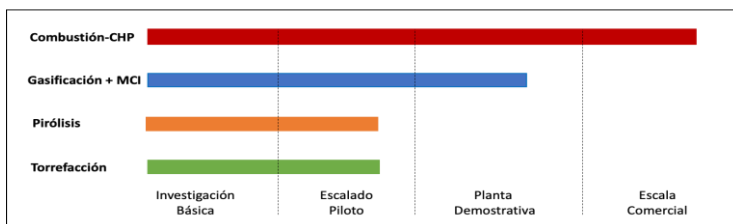


Figura 3. Estado de avance de las tecnologías de aprovechamiento de biomasa lignocelulósica con fines energéticos en Chile.

• **Tecnología de Torrefacción en Chile: Densificación termoquímica**

La torrefacción es un pretratamiento termoquímico similar a la pirólisis, pero opera a menores temperaturas (<320 °C) y su objetivo fundamental es producir un combustible densificado con propiedades (poder calorífico, estabilidad, densidad energética, etc.) superiores a la biomasa sin tratar. Mediante este proceso la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente a través de la devolatilización y deshidratación de los polímeros constituyentes, principalmente la hemicelulosa. El material sólido que resulta de este pre-tratamiento es generalmente hidrofóbico, bio-resistente y fácil de moler, lo que lo convierte en un sustituto natural del carbón mineral (Arteaga-Pérez, Segura, and Diéguez 2016).



Figura 4. Planta Piloto de Torrefacción instalada en UDT. (Fuente: Nelson Zbiden, UDT-Chile, junio de 2015).

La única planta de torrefacción instalada en Chile, fue desarrollada por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción con el apoyo de las empre-

sas Engie Energía y Forestal Calle-Calle y con financiamiento de CORFO-CHILE (14IDL4-30438). La planta, representada en la Figura 4, cuenta con un reactor de múltiples etapas con flujo descendente a contracorriente con el medio de calentamiento (vapor sobrecalentado). Además, tiene un sistema de ciclones para la eliminación de material particulado en los vapores de torrefacción y una red de sobrecalentamiento para el vapor de agua. Mayores detalles sobre esta planta y sus características técnicas se pueden consultar en la literatura (Arteaga-Pérez et al. 2017). En las pruebas preliminares realizadas a nivel piloto, se obtuvo un combustible sólido mejorado (Ver inserto en Figura 4), con propiedades similares a los estándares reportados en la literatura (Arteaga-Pérez et al. 2017).

Considerando que estos pellets torrefactados tienen como objetivo sustituir al carbón mineral de sus aplicaciones actuales, se utilizaron los mismos en ensayos piloto de co-combustión. En ese sentido se encontraron resultados muy alentadores en cuanto a eficiencia de combustión (>97%), composición de los gases (reducida en SO_x y MP_{2,5}) y desempeño ambiental. Este último aspecto se aborda más en detalle en las secciones siguientes.

• ***Tecnología de Pirólisis en Chile: Producción de bio-aceite y bio-carbón***

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica que ocurre a elevadas temperaturas (350°C - 600°C) y cuyo objetivo es la obtención de productos sólidos o líquidos a partir de la deconstrucción de la estructura polimérica de la materia prima. El producto líquido de la pirólisis (bio-aceite) tiene aplicaciones promisorias en el área de la química y los combustibles (Rodríguez-Machín 2019). Sin embargo, cuando se utiliza biomasa lignocelulósica como materia prima el bio-aceite resultante es de baja calidad, fundamentalmente debido a su: alto contenido de oxígeno (46 - 51%), pH ácido (2-3), viscosidad (40 - 100 cP), inestabilidad en el tiempo (reactividad entre grupos funcionales), entre otros problemas (Yu, C. Zhang 2001). Es por ello que se requieren procesos de mejoramiento durante o posteriores a la pirólisis, entre los que destacan la pirólisis catalítica, la hidrodeoxigenación y el craqueo catalítico.

Por otra parte, el producto sólido (bio-carbón) tiene numerosas aplicaciones (algunas a nivel comercial) y es una alternativa muy atractiva para valorizar residuos con alto impacto ambiental (ej. Estiércol de animales, residuos sólidos con alto contenido de cenizas, etc.). Entre las aplicaciones más recientes están su uso como enmendador de suelos o bio-fertilizante (Yang et al. 2020), aplicaciones en el área de la catálisis (Chi et al. 2020), como adsorbente en la eliminación de olores y contaminantes en cuerpos líquidos (Hassan et al. 2020), entre otras. Cuando se pretende obtener un producto líquido, la velocidad de transferencia de calor hacia las partículas de biomasa (>1000 °C/s), el tiempo de residencia en el reactor (pirólisis rápida o flash) y el proceso de condensación de los vapores, deben controlarse de manera estricta, para evitar reacciones secundarias y maximizar los volúmenes producidos. Mientras que, para maximizar la producción de sólidos, suele desarrollarse el proceso en condiciones más tenues (pirólisis lenta o intermedia) que conlleven al entre-

cruzamiento estructural del carbón y por ende a una mayor porosidad y estabilidad térmica.

En Chile hay varias plantas de pirólisis instaladas; sin embargo, las únicas instalaciones para el procesamiento (a nivel piloto) de biomasa, están ubicadas en la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción (Coronel). En este instituto existen capacidades para producir bio-aceite y bio-carbones a través de procesos de pirólisis flash e intermedia (Ver Figura 5).



Figura 5. Izq. Instalación de pirólisis Flash. UDT 2019. Capacidad 20 kg/h de biomasa, Tiempo de residencia 2 seg. y temperatura hasta 580 °C. Der. Instalación de pirólisis intermedia. UDT 2019. Capacidad 20 kg/h de biomasa, tiempo de residencia (varios min) y temperatura hasta 580 °C. (Fuente: Héctor Grandón, abril 2020).

Los productos que se han obtenido en estas plantas han sido aplicados en la obtención de adhesivos de bajo impacto, adsorbentes, bio-fertilizantes y catalizadores. Sin embargo, la validación de su competitividad ambiental en referencia a otros productos del mercado aún no se ha explorado.

- ***Tecnología de Gasificación en Chile: Producción de calor y potencia.***

La gasificación es un proceso de oxidación parcial aplicado a materiales carbonaceos y que tiene antecedentes que datan de siglos pasados. Este proceso ha sido aplicado con mayor o menor grado de éxito en: procesos de reducción de acero, generación de calor y electricidad, producción de gas natural sintético e incluso en automóviles (Ver Figura 6).

En Chile, el interés por la gasificación ha variado en concordancia con las políticas nacionales; sin embargo, los avances más significativos están enfocados a: (1) el mejoramiento de los gases a través de estrategias avanzadas para remover alquitra-

nes, NH_3 , H_2S , etc., y (2) la instalación de plantas demostrativas para generación de electricidad en el sur del país.



Figura 6. Planta de generación de calor y electricidad a base biomasa en Chile.
(Fuente: Jorge Herrera, mayo 2021).

Quizás los ejemplos más significativos en esta área están en el proyecto desarrollado por el Centro de estudios de recursos energéticos de la Universidad de Magallanes (CERE-UMAG). Dicho proyecto estudió la utilización de un equipo All Power Lab de 10 kW de potencia (www.allpowerlabs.com) y alimentado con astillas de lenga como alternativa para la electrificación de viviendas en zonas remotas. Esta planta mostró excelente desempeño para su uso a nivel doméstico y con posibilidades de utilizar diferentes tipos de biomasa. Además, en la UDT-Universidad de Concepción se desarrolló un estudio sobre el uso de biocarbones como catalizadores para la limpieza de gases de gasificación y, el posterior uso de estos gases en unidades de baja potencia <2MW. Uno de los aprendizajes más relevantes de estos trabajos estaba relacionado con la relevancia ambiental que tenían las etapas anteriores a la gasificación (cultivo, cosecha y pre-tratamiento de la biomasa) en el desempeño ambiental de la tecnología. Sobre este aspecto se aborda más adelante en el presente capítulo.

- ***Tecnología de Combustión en Chile: Producción de calor y potencia.***

Las plantas de combustión de biomasa para generación de calor y potencia a nivel industrial en Chile, usan la materia prima en formato astillas, corteza, aserrín o mezclas. Además de estas instalaciones, existen diferentes tecnologías de pequeña escala para el uso doméstico de biomasa (estufas de combustión lenta, estufas de baja eficiencia, estufas a pellets, etc.) (Ver Figura 7) (Educar Chile 2020).

Los sistemas industriales más comunes son los que cuentan con calderas de media-alta presión integradas a turbinas de vapor en ciclos tradicionales y cuyo fin es el auto-abastecimiento de las necesidades de utilidades en industrias de celulosa y papel (Capacidades entre 5 y 140 MW netos). El beneficio de ocupar biomasa con estos fines es relevante, pues permite integrar corrientes residuales de la industria forestal en procesos productivos de importancia económica para el país. Asimismo, se considera una alternativa para desplazar las plantas a carbón de la matriz eléctrica nacional (antes de 2030) y una forma de diversificar el mercado dando entrada a actores del rubro forestal al mercado de la energía. De hecho, el plan para alcanzar este objetivo, incluye la descarbonización de la matriz energética del país a través de la "Mesa de Retiro y/o Reconversión de Centrales a Carbón", que establece el cese de los primeros 1.047 MW de las ocho centrales más antiguas del país como etapa inicial. Estas instalaciones se encuentran en Iquique (1), Tocopilla (4), Puchuncaví (2) y Coronel (1) y representan cerca del 19% total de la capacidad instalada en las centrales a carbón. Esta decisión es una oportunidad para la entrada de la biomasa al mercado energético de gran capacidad, aunque hasta la fecha, el reemplazo se enfoca en otras tecnologías (ej. Solar y eólica).

Uno de los argumentos más recurrentes a favor de utilizar biomasa lignocelulósica como combustible es su origen renovable, y se asume -en muchos casos- que esta característica valida a la biomasa como un combustible sostenible desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, la única forma de demostrar la sostenibilidad de una alternativa tecnológica, cualquiera que esta sea, es a través de la cuantificación de sus impactos ambientales a través de la aplicación de metodologías que consideren el pensamiento de ciclo de vida. En este sentido, existen varias normativas que regulan la aplicación de métodos que, en mayor o menor grado de detalle, ofrecen información sobre los efectos ambientales a través de su correlación con las emisiones a la atmósfera, suelos y agua, así como con el entorno social y los ecosistemas. En la Parte II del presente Capítulo se aborda este aspecto y se ofrecen detalles metodológicos para aplicarlo a sistemas de generación de energía.

4. Estudios de impacto ambiental aplicados al uso de biomasa. Generalidades y antecedentes.

La evaluación de los impactos ambientales de la producción de biomasa forestal y bio-productos energéticos, ha sido materia de desarrollo de múltiples estudios. En efecto, el uso del enfoque de ciclo de vida ha presentado diversas ventajas para identificar las etapas de proceso que aportan mayoritariamente a los impactos ambientales. Metodológicamente esa es una de las principales fortalezas del ACV, el cual permite identificar, y posteriormente, gestionar las etapas de proceso más intensivas (Weidema 2006). Un breve análisis estadístico de los estudios científicos que se han publicado entre los años 2009-2020 y están en la base de datos de Scopus se presenta a continuación, considerando aquellas publicaciones con foco en la conversión termoquímica de la madera (ver Fig. 8). De la estadística se observa que hay una tendencia creciente a desarrollar estudios de ACV para la conversión de la madera, principalmente con foco en la energía (29,4%), seguida del foco me-

dioambiental (25,5%). Asimismo, se observa que la mayor parte de los estudios proviene desde países desarrollados, siendo Brasil el único sudamericano que aparece con 3 publicaciones durante el período. Esto implica un importante desafío de seguir formando capacidades en la región y desarrollando proyectos que propendan a la integración de estudios ACV para el sector bioenergía, tal que describan la realidad sitio-específica. Los estudios publicados, en su mayoría (68,9%), corresponden a artículos de investigación que reportan resultados originales, respaldando su continuo desarrollo para proveer información relevante para la toma de decisión.

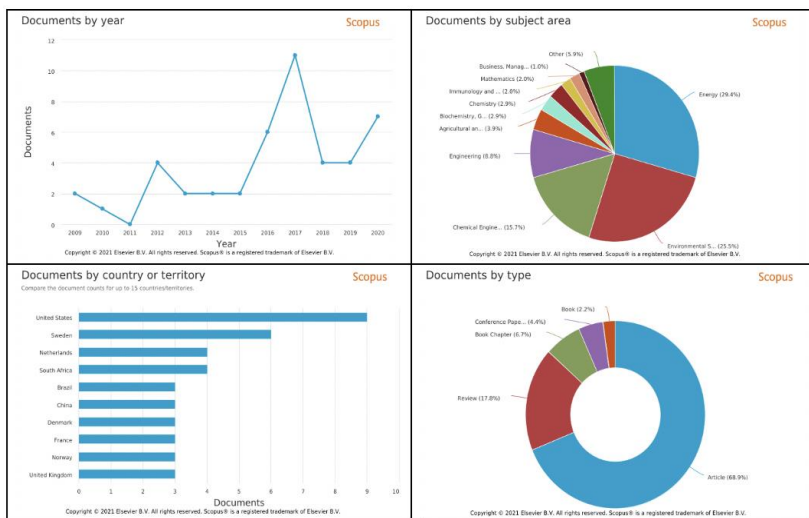


Figura 8. Estadística de publicaciones en base de datos científica Scopus, con estudios dedicados al ACV de la bioenergía. (Fuente: Scopus, según criterio de búsqueda bibliográfica utilizado en este reporte. Elaboración propia).

Dada la diversidad de biomásas lignocelulósicas disponibles en cada país, el análisis sitio-específico de las diferentes fuentes y sus respectivas posibilidades de ser transformadas térmica, química y físicamente han sido estudiadas a lo largo de la cadena de valor. Estudios que han analizado comparativamente el desempeño ambiental de los procesos de extracción de la madera con diversos tipos de madera en Serbia y Brasil (Ferro et al. 2018; Peric et al. 2020), han encontrado diferentes cargas ambientales vinculadas al uso intensivo de maquinarias y combustible en la fase de cosecha forestal. En el mismo sentido, la alta carga ambiental del procesamiento de la madera en Serbia dio cuenta de lo obsoleta de la tecnología disponible, específicamente para el astillado (Peric et al. 2020). Asimismo, el análisis ambiental del manejo descentralizado de la biomasa para producir pellets en Chipre, junto con el uso de energías renovables permiten reducir la carga ambiental de la producción

(Kylili, Christoforou, and Fokaides 2016). Estos estudios revelan la importancia de evaluar comparativamente diferentes fuentes de biomasa, incluyendo sus etapas tempranas de extracción. Con el propósito de evaluar costo-ambientalmente la biomasa de origen forestal versus la agrícola, se encontró que la primera tiene un menor costo de transporte y carga ambiental en comparación con la segunda. Esta diferencia se atribuyó a los altos requerimientos de insumos químicos, almacenamiento y combustibles fósiles que necesita la biomasa agrícola (Daystar et al. 2014).

Si bien, los procesos de producción de la biomasa lignocelulósica son relevantes y muestran diferencias importantes en su carga ambiental, es claro que al avanzar en su ciclo de vida de procesamiento aparecen otras etapas que podrían ser más intensivas. En efecto, para abordar con enfoque desde la cuna a la puerta del proceso de obtención de biocombustibles, la etapa de producción de biomasa podría ser una etapa secundaria dentro del perfil ambiental, si se considera toda la cadena de valor del producto. Lo anterior tiene varias implicancias, siendo las primordiales:

- 1) ampliar los límites del sistema a estudiar e incluir los diferentes procesos de conversión termoquímica de la madera, y
- 2) asegurar la calidad de los datos de proceso tal que los resultados y la interpretación sean precisos y consistentes.

Existen diferentes alternativas de procesamiento de la biomasa lignocelulósica, tal como se muestra en la Figura 2. Uno de ellos, y que ha sido motor del desarrollo de diversos estudios de evaluaciones ambientales, es la producción de bioetanol, dado su amplio uso como combustible alternativo. La mayor parte de los estudios ambientales de la producción de bioetanol han estado enfocados a cuantificar el aporte a calentamiento global y/o consumo de energía fósil, evidenciando una reducción de las emisiones de gases con efecto invernadero en comparación con sistemas fósiles de referencia (Borrion, McManus, and Hammond 2012). Esta es una de las razones que normalmente se esgrime como ventajas del uso de la biomasa lignocelulósica, siendo otra fuerza motriz la búsqueda de fuentes renovables que eviten la competencia con la producción de alimentos, como lo que ocurre con el maíz, caña de azúcar, entre otros. En este sentido, el análisis ambiental comparativo de la producción de bioetanol desde algarrobo negro presentó un menor impacto ambiental con respecto a la gasolina, principalmente por su baja demanda de insumos en la etapa agrícola (González-García, Moreira, et al. 2012). También se han estudiado procesos modificados para la producción de bioetanol (Shadbahr, Zhang, and Khan 2015) y metanol (Yadav et al. 2020) a partir de biomasa forestal encontrando mejoras en diversas categorías de impacto ambiental, con respecto a los procesos tradicionales de obtención. En este mismo sentido y con el propósito de comparar procesos bioquímicos y los termoquímicos para la producción de etanol desde chip de madera, rastrojo de maíz, papel residual y paja de trigo, los resultados mostraron que la conversión bioquímica tiene una menor carga de gases con efecto invernadero, pero la conversión termoquímica tiene un menor consumo de agua (Mu et al. 2010). En ambos casos, es necesario analizar en detalle los resultados por tipo de biomasa utilizada, junto con los pros y contras de cada opción.

Otras evaluaciones ambientales que han buscado el énfasis en el reemplazo de fuentes de energía existentes han comparado los escenarios de producción y uso de etanol, vía hidrólisis enzimática, versus la producción de electricidad a través de la gasificación de madera en ciclo combinado, obteniendo que desde la perspectiva energética la mejor elección es la producción de bio-etanol, mientras que la electricidad sería la mejor alternativa si el énfasis es calentamiento global (González-García, Iribarren, et al. 2012). Enfocándose exclusivamente en la generación eléctrica (Loução et al., 2019) evaluaron 11 alternativas de producción de electricidad a partir de biomasa de diversa índole, mostrando que no existe una única solución que permita entregar un desempeño positivo en todas las categorías de impacto. Tal como Mu et al. (2010) lo había identificado para la producción de bioetanol y ahora Loução, Ribau, and Ferreira (2019) lo demuestra para la generación eléctrica, se empiezan a evidenciar diferentes casos en que existen compensaciones o *trade-off*, donde no es posible identificar un único proceso que cumpla con tener todos los aspectos ambientales positivos. Sin embargo, del análisis de sensibilidad se demuestra que los datos de entrada podrían cambiar significativamente los resultados (Loução et al., 2019), poniendo especial énfasis en la importancia de los aspectos metodológicos que involucra cada ACV, siendo un desafío en sí mismo y con abundantes fuentes de incertidumbre.

Con el propósito de evaluar ambientalmente otras alternativas tecnológicas para el aprovechamiento energético de la biomasa, se han analizado la producción de pellets de biomasa y biomasa torrefactada (a partir de pino silvestre en plantas de proceso ubicadas en Noruega y enviada a Reino Unido para ser usado en plantas de energía), obteniendo un relativo mejor desempeño de la biomasa torrefactada por MJ de energía, gracias a su mayor poder calorífico. El análisis de sensibilidad de estos resultados indica que las mejoras asociadas al pellet torrefactado comparadas con el pellet sin tratamiento están fuertemente relacionadas la energía para el secado de la biomasa, y el aporte que puede proporcionar el gas de torrefacción recirculado a ésta (Adams, Shirley, and McManus 2015). En otro análisis reciente se evaluó la obtención de biodiesel y otros biocombustibles desde diversos tipos de biomasa para su uso en transporte portuario, encontrando que, en términos generales, se logra una mejora en el desempeño ambiental gracias a su uso, y se evidencian importantes beneficios en el aporte al calentamiento global impulsado por la producción de bio-hidrógeno, así como mejoras ambientales por la producción de otros biocombustibles (Tsalidis et al. 2017). Sin embargo, es necesario tener en consideración que el desempeño en categorías de impacto ambiental como acidificación, formación de material particulado y eutrofización de estos biocombustibles es más bajo que los sistemas fósiles de referencia (Tsalidis et al. 2017). Profundizando en el análisis de alternativas para la producción de biocombustibles, se ha explorado ambientalmente la posibilidad de configurar procesos sin necesidad de adaptar la tecnología de uso, mostrando que las etapas más relevantes del análisis ambiental son el cultivo, cosecha, pretratamiento de la biomasa y transporte, enfatizando en que el uso de biomasa local implicaría ventajas significativas en cambio climático, especialmente si son de origen lignocelulósico (Kargbo, Harris, and Phan 2021).

En un esfuerzo por ir más allá en la integración de procesos para la producción de bioenergía se ha evaluado ambientalmente el tratamiento de efluentes, plantaciones de sauce junto con la cogeneración de vapor y electricidad (Buonocore, Franzese, and Ulgiati 2012). Los resultados muestran que esta integración es beneficiosa como una opción de producción de bioenergía orientada a carbono neutralidad. Además, los resultados respaldan que los sistemas de cogeneración son capaces de generar energía con menor carga ambiental que los sistemas fósiles tradicionales electricidad (Buonocore et al. 2012). Considerando este caso de estudio y comprendiendo que el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento total de la biomasa requiere una visión integral, más allá de plantear procesos por separado, las biorrefinerías se posicionan como una alternativa tecnológica que permitiría integrar diversas operaciones para obtener productos de diferentes características. Por lo anterior, las biorrefinerías se plantean como una alternativa para alcanzar un modelo de economía circular. Es por ello que se ha evaluado comparativamente el proceso de pirólisis de biomasa en biorrefinerías en Francia, usando como insumo la biomasa residual, versus el escenario de referencia, en que la biomasa es dejada en el suelo para su degradación. Los resultados ambientales entregan que la pirólisis presenta compensaciones o *trade-off* en 6 de 16 categorías de impacto evaluadas, evidenciando nuevamente pros y contras en el proceso (Brassard, Godbout, and Hamelin 2021). Más aún, las biorrefinerías además de ser alternativa tecnológicamente factible, han sido recientemente analizadas para integrarlas con las existentes refinerías petroquímicas, pudiendo facilitar el reemplazo de productos fósiles sin la necesidad de desarrollar nuevas infraestructuras (Kumar and Verma 2020).

Con el propósito de abordar otros aspectos del desempeño global de la bioenergía, estudios en ACV para biorrefinerías han estado dirigidos a incluir el ámbito social. Para ello se ha desarrollado una metodología de evaluación de aspectos sociales en la etapa de diseño, usando como caso de estudio una biorrefinería en Países Bajos. Los resultados muestran que es posible obtener una visión general de donde estarían concentrados los potenciales impactos sociales en la cadena de valor de una biorrefinería (Cadena et al. 2019). Sin embargo, y tal como se ha mencionado, hay aspectos metodológicos relevantes que seguir fortaleciendo en la cuantificación de impactos a través de un ACV de la bioenergía. Tal como fue advertido por Borrión, McManus, and Hammond (2012) las diferencias en los procesos productivos de biocombustibles generan diferentes resultados del desempeño ambiental, debido a diferentes datos de entrada, enfoque metodológico y condiciones sitio-específicas.

5. Reflexiones Finales. Aportes para el Maletín de Buenas Prácticas

De los resultados obtenidos se observa que existen diversas versiones sobre las principales etapas aportantes a las categorías de impacto evaluadas en sistemas bio-energéticos. En algunos casos se menciona la etapa de cultivo de la biomasa, en otros el proceso de conversión como las principales aportantes al cambio climático. De igual forma ocurre con otras categorías de impacto, como la acidificación, la eutrofización, ecotoxicidad, y salud humana, donde en algunos estudios se reportan mayores impactos que la producción de gasolinas y en otros menores. Asimismo, el consumo de agua demuestra variar significa-

tivamente según el tipo de biomasa cultivada, el sistema y requerimientos de irrigación, además de resultados no concluyentes sobre la etapa que más demanda agua; cultivo o conversión. Lo anterior sugiere que los resultados de un ACV son directamente dependientes de la definición del límite del sistema, de la unidad funcional, calidad de datos y método de asignación de cargas (Borrión et al. 2012). Otras causas identificadas para las diferencias en los resultados están principalmente vinculadas a los supuestos y a las elecciones metodológicas (Muench and Guenther 2013; Patel, Zhang, and Kumar 2016). En este sentido Lijó et al. (2019), demostró que los resultados asociados a procesos de termoconversión sólo podrían ser comparables en la medida que exista un enfoque estandarizado. Esta propuesta es la que plantea en su análisis crítico Katakajwala and Mohan (2021), los cuales comentan la necesidad de que las aplicaciones de ACV a biorrefinerías requieren ser sistematizadas y optimizadas con estándares específicos para el sector, que permitan una detallada y precisa evaluación. Por lo anterior, antes de hacer un correcto ACV es fundamental tener claridad en la base metodológica y todos los aspectos que ésta define como requisitos con el propósito de tener claridad en todas las restricciones de los resultados e interpretación que se pueden obtener. A pesar de estas ideas, limitaciones y potenciales, existe consenso en que el uso de herramientas para la cuantificación de impactos ambientales asociados a tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa, es un pilar para el desarrollo de estrategias sostenibles en el sector.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigaciones (ANID-Chile) por el financiamiento ofrecido a través de los proyectos: FONDECYT1190063, FONDECYT 11170302 y PIA/AFB 17007.

Referencias

- AchBIOM. (2017). Mercado Del Pellet en Chile. Recuperado de: <http://www.anuc.co/quienes-somos.asp%0Ahttps://www.auralac.com/nuestra-empresa/quienes-somos>.
- Adams, P. W. R., J. E. J. Shirley, and M. C. McManus (2015). "Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Wood Pellet Production with Torrefaction." *Applied Energy* 138:367–80.
- Arteaga-Pérez, L. E., H. Grandón, M. Flores, C. Segura, and S. S. Kelley (2017). "Steam Torrefaction of Eucalyptus Globulus for Producing Black Pellets: A Pilot-Scale Experience." *Bioresource Technology* 238.
- Arteaga-pérez, Luis Ernesto, Cristina Segura, and Karel Diéguez (2016). "Procesos de Torrefacción Para Valorización de Residuos Lignocelulósicos. Análisis de Posibles Tecnologías de Aplicación En Sudamérica." *Afinidad* 572(73):1–9.
- Berg, A., M. Díaz, Ch. Bidart, A. Pacheco, D. Espinoza, S. Praus, M. Flores, A. Morga, N. Müller, and C. Segura (2013). Estudio "Recomendaciones Para La Elaboración de Una Estrategia Nacional de Bioenergía. Concepción: Ministerio de Energía.

-
- Bertrán, J. and E. Morales (2008). Potencial de Generación de Energía Por Residuos Del Manejo Forestal En Chile. Proyecto Energías Renovables. Santiago de Chile.
- Borrion, Aiduan Li, Marcelle C. McManus, and Geoffrey P. Hammond (2012). "Environmental Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Conversion to Ethanol: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**(7):4638–50.
- Brassard, P., S. Godbout, and L. Hamelin (2021). "Framework for Consequential Life Cycle Assessment of Pyrolysis Biorefineries: A Case Study for the Conversion of Primary Forestry Residues." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **138**:110549.
- Buonocore, Elvira, Pier Paolo Franzese, and Sergio Ulgiati (2012). "Assessing the Environmental Performance and Sustainability of Bioenergy Production in Sweden: A Life Cycle Assessment Perspective." *Energy* **37**(1):69–78.
- Cadena, Erasmo, Francesco Rocca, Jose A. Gutierrez, and Ana Carvalho (2019). "Social Life Cycle Assessment Methodology for Evaluating Production Process Design: Biorefinery Case Study." *Journal of Cleaner Production* **238**:117718.
- Chi, Nguyen Thúy Lan, Susaimanickam Anto, Tharifikhan Shan Ahamed, Smita S. Kumar, Sabarathinam Shanmugam, Melvin S. Samuel, Thangavel Mathimani, Kathirvel Brindhadevi, and Arivalagan Pugazhendhi (2020). "A Review on Biochar Production Techniques and Biochar Based Catalyst for Biofuel Production from Algae." *Fuel* **119**:411.
- CORMA (2020). "Creciente Desarrollo de La Industria de Biomasa: La Energía Renovable Que Nace de Los Bosques." XV Simposio de Celulosa y Papel. Retrieved (<https://www.corma.cl/xv-simposio-de-celulosa-y-papel-05/%0D%0A%0D%0A>).
- Daystar, Jesse, Ronalds Gonzalez, Carter Reeb, Richard Venditti, Trevor Treasure, Robert Abt, and Steve Kelley (2014). "Economics, Environmental Impacts, and Supply Chain Analysis of Cellulosic Biomass for Biofuels in the Southern Us: Pine, Eucalyptus, Unmanaged Hardwoods, Forest Residues, Switchgrass, and Sweet Sorghum." *BioResources* **9**(1):393–444.
- Educar Chile (2020). "Centrales de generación eléctrica biomasa." Retrieved (<https://www.aprendeenergia.cl/centrales-de-generacion-electrica-biomasa/>).
- Ferro, Fabiane Salles, Diogo Aparecido Lopes Silva, Felipe Hideyoshi Iimoto, Francisco Antonio Rocco Lahr, and Sara González-García (2018). "Environmental Life Cycle Assessment of Industrial Pine Roundwood Production in Brazilian Forests." *Science of The Total Environment* **640–641**:599–608.
- González-García, Sara, Diego Iribarren, Ana Susmozas, Javier Dufour, and Richard J. Murphy (2012). "Life Cycle Assessment of Two Alternative Bioenergy Systems Involving Salix Spp. Biomass: Bioethanol Production and Power Generation." *Applied Energy* **95**:111–22.
- González-García, Sara, M. Teresa Moreira, Gumersindo Feijoo, and Richard J. Murphy (2012). "Comparative Life Cycle Assessment of Ethanol Production from Fast-Growing Wood Crops (Black Locust, Eucalyptus and Poplar)." *Biomass and Bioenergy* **39**:378–88.
- González, P., V. Álvarez, M. Strange, C. Herrera, M. Cohen, and E. Pardo (2007). Disponibilidad de Residuos Madereros. Residuos de La Industria Primaria de La Madera • Disponibilidad Para Uso Energético. Stgo Chile.
-

-
- Gysling, Ana, Verónica Álvarez, Daniel Soto, Evaristo Pardo, Pamela Poblete, and C. Khaler (2019). "Anuario Forestal 2019." [Chilean Statistical Yearbook of Forestry 2019] (168):232.
- Hassan, Masud, Yanju Liu, Ravi Naidu, Sanjai J. Parikh, Jianhua Du, Fangjie Qi, and Ian R. Willett (2020). "Influences of Feedstock Sources and Pyrolysis Temperature on the Properties of Biochar and Functionality as Adsorbents: A Meta-Analysis." *Science of The Total Environment* 744:140714.
- INFOR (2020). Subproductos madereros de la industria del aserrío.
- Kargbo, Hannah, Jonathan Stuart Harris, and Anh N. Phan (2021). "'Drop-in' Fuel Production from Biomass: Critical Review on Techno-Economic Feasibility and Sustainability." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135:110168.
- Katakajwala, Ranaprathap and S. Venkata Mohan (2021). "A Critical View on the Environmental Sustainability of Biorefinery Systems." *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 27:100392.
- Kumar, Bikash and Pradeep Verma (2020). "Biomass-Based Biorefineries: An Important Archetype towards a Circular Economy." *Fuel* 119622.
- Kyllili, Angeliki, Elias Christoforou, and Paris A. Fokaides (2016). "Environmental Evaluation of Biomass Pelletting Using Life Cycle Assessment." *Biomass and Bioenergy* 84:107–17.
- Lijó, L., S. González-García, M. T. Moreira, and G. Feijoo (2019). "Life Cycle Assessment of Renewable Energy Production from Biomass." in *Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies*. Springer.
- Loução, Pedro O., João P. Ribau, and Ana F. Ferreira (2019). "Life Cycle and Decision Analysis of Electricity Production from Biomass – Portugal Case Study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 108:452–80.
- Magalhães Jr., Antonio Irineudo, Júlio Cesar de Carvalho, Gilberto Vinícius de Melo Pereira, Susan Grace Karp, Marcela Candido Câmara, Jesus David Coral Medina, and Carlos Ricardo Soccol (2019). "Lignocellulosic Biomass from Agro-Industrial Residues in South America: Current Developments and Perspectives." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13(6):1505–19.
- Ministerio de Energía (2020). Reporte Mensual ERNC: Nov 2020. Santiago de Chile.
- Mu, Dongyan, Thomas Seager, P. Suresh Rao, and Fu Zhao (2010). "Comparative Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Ethanol Production: Biochemical Versus Thermochemical Conversion." *Environmental Management* 46(4):565–78.
- Muench, Stefan and Edeltraud Guenther. 2013. "A Systematic Review of Bioenergy Life Cycle Assessments." *Applied Energy* 112:257–73.
- Ojeda, María Luisa, Humberto Vidal, Cristina Segura, and Luis E. Artega-Pérez (2020). "II. 2. Situación de Tecnologías de Biomasa En Chile." P. 269 in *Recur-sos, tecnologías, transferencia y políticas: una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía en Iberoamérica*. Manrique S, Torreiro Villariño Y, Contreras Rodríguez ML, Sánchez Hervás JM, Garrido S, Curbelo Alonso A. (Editores) (2020). ISBN 978-84-15413-32-5. CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). Madrid, España. <http://www.cytod.org/es/biblioteca/primer-libro-de-la-red-rebir-t>
- Patel, Madhumita, Xiaolei Zhang, and Amit Kumar (2016). "Techno-Economic and Life Cycle Assessment on Lignocellulosic Biomass Thermochemical Conversion
-

-
- Technologies: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53:1486–99.
- Peric, M., D. Antonijevic, M. Komatina, B. Bugarski, and M. Rakin (2020). "Life Cycle Assessment of Wood Chips Supply Chain in Serbia." *Renewable Energy* **155**:1302–11.
- Research, Center for climate and resilience (2020). Informe a Las Naciones: El Aire Que Respiramos: Pasado, Presente y Futuro.
- Rodríguez-Machín, Lizet (2019). "Techno-Economic Assessment of the Thermochemical Conversion of Cuban Sugar Cane Lignocellulosic Residues into Liquid Biofuels." Ghent University.
- Shadbahr, Jalil, Yan Zhang, and Faisal Khan (2015). "Life Cycle Assessment of Bioethanol Production from Woodchips with Modifications in the Pretreatment Process." *Applied Biochemistry and Biotechnology* **175**(2):1080–91.
- Tsalidis, Georgios Archimidis, Fadhila El Discha, Gijsbert Korevaar, Wim Haije, Wiebren de Jong, and Jaap Kiel (2017). "An LCA-Based Evaluation of Biomass to Transportation Fuel Production and Utilization Pathways in a Large Port's Context." *International Journal of Energy and Environmental Engineering* **8**(3):175–87.
- UFRO (2014). Evaluación Del Uso de Biomasa Forestal Para Generación de Electricidad a Través de Procesos de Co-Combustión En Chile.
- Weidema, Bo P. (2006). "The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **11**(1):89–96.
- Yadav, Pooja, Dimitris Athanassiadis, Dalia M. M. Yacout, Mats Tysklind, and Venkata K. K. Upadhyayula (2020). "Environmental Impact and Environmental Cost Assessment of Methanol Production from Wood Biomass." *Environmental Pollution* 265:114990.
- Yang, Lu, Yunchao Wu, Yichu Wang, Weiqi An, Jie Jin, Ke Sun, and Xiangke Wang. (2020). "Effects of Biochar Addition on the Abundance, Speciation, Availability, and Leaching Loss of Soil Phosphorus." *Science of The Total Environment* 143657.
- Yu, C. Zhang, W. (2001). Progress in Thermochemical Biomass Conversion. edited by A. Bridgewater. Oxford: Blackwell Science Ltd.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso VII, 2021: 139-168
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO VII. Impactos ambientales asociados al aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos: Parte II: Metodología y Aplicaciones

Yannay Casas Ledón^{1,2} Mauricio Flores²
Mabel Vega³, Maray Ortega⁴, Luis E. Arteaga Pérez^{2,4*}

¹Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad Ciencias Ambientales-Centro EULA, Universidad de Concepción, Concepción, 4030000, Chile

²Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Concepción, 4030000, Chile

³Departamento Ing. En Maderas, Universidad del Bio-Bio, Concepción, 4030000, Chile

⁴Laboratorio de Proceso Térmicos y Catalíticos (LPTC-UBB), Universidad del Bio-Bio, Concepción, 4030000, Chile

Resumen. Los nuevos paradigmas de la sustentabilidad imponen límites razonables a la explotación de recursos, y enfatizan en el desarrollo de herramientas metodológicas, que posibiliten la cuantificación de impactos ambientales e interpretación de éstos en un marco de análisis sistémico. En este contexto, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es reconocida como una de las principales herramientas para la evaluación sistémica de la sustentabilidad. En el presente capítulo, se muestran los aspectos metodológicos relevantes para la aplicación del ACV para evaluar los impactos ambientales asociados al aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos. Unido a lo anterior, se ejemplifican las potencialidades de esta herramienta a través de un caso de estudio (uso de Pellets de biomasa torrefactada como reemplazo en calderas a carbón).

*Correspondencia: Luis E. Arteaga Pérez, E-mail: larteaga@ubiobio.cl

1. Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo resumir aspectos metodológicos relevantes para la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida a la evaluación de tecnologías energéticas. Particular, énfasis se pone en aquellos elementos críticos y que garantizan la fiabilidad de bases de datos y resultados y su posterior inter-relación con las categorías de impacto cuantificables. Finalmente, se incluye un ejemplo que ilustra las potencialidades del método para evaluar nuevas tecnologías de producción de combustibles derivados de biomasa (pellets torrefactados) y su aplicación a la reconversión de sistemas energéticos convencionales (generadoras a carbón).

1.1. Marco metodológico para la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida a tecnologías de generación de energía.

La evaluación del ciclo de vida (sus siglas en inglés, LCA) es una de las herramientas de gestión ambiental que se centra en la evaluación del desempeño ambiental de productos, procesos y servicios. Esta metodología permite identificar, cuantificar y evaluar los diferentes impactos ambientales asociados al ciclo de vida del sistema en estudio. La evaluación del ciclo de vida tiene en cuenta el ciclo completo de un producto: desde la extracción de recursos, a través de la producción, uso y reciclaje, hasta la eliminación de los residuos como se muestra en la Figura 1.

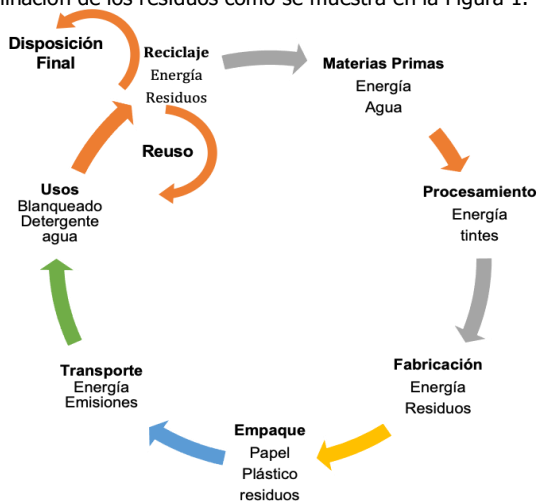


Figura 1. Ejemplos de etapas dentro del ciclo de vida de la fabricación de una camiseta (Fuente: elaboración propia).

El ACV no es la única herramienta para analizar el desempeño ambiental, pero el mayor valor del ACV es la articulación entre el criterio ambiental a través de todo el

ciclo de vida, con las estrategias de la empresa, además de la planificación para alcanzar beneficios comerciales. El ACV puede proveer a una empresa información valiosa sobre la eficiencia del uso de los recursos y el manejo de residuos, aportando al diseño de mejora de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida. Al mismo tiempo, aporta a las empresas ventajas competitivas a través del ahorro financiero, incrementar ganancias y mejorar la imagen (de la empresa o de un producto determinado).

El ACV es una herramienta fundamental en la etapa de diseño de productos o servicios ("EcoDesign") así como en el Eco-etiquetado ("EcoLabelling"). El eco-diseño considera un enfoque proactivo de gestión ambiental que tiene como objetivo reducir el impacto ambiental en el diseño en todo el ciclo de vida del producto, desde la cuna hasta la tumba, es decir desde el origen de los recursos hasta el manejo de los residuos finales (Singh and Sarkar 2018).

Uno de los principales problemas para la implementación del eco-etiquetado es que debe ser creíble y reconocido por la sociedad. Por ello necesita un procedimiento transparente, con estricta metodología científica y homologación internacional; esto lo provee un estándar ISO de ACV. Los estándares ISO para etiquetado Tipo I y III especifican el uso de ACV como una metodología viable.

El ACV ofrece información valiosa en el ámbito de las políticas públicas, mejorando el proceso de toma de decisiones y, a su vez, conduciendo a mejores resultados ambientales. Experiencias exitosas de la utilización de la evaluación del ciclo de vida en el desarrollo de políticas públicas han sido adoptadas por la Unión Europea, Japón, Australia y muchos otros países (Seidel 2016).

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, han emergido nuevas filosofías basadas en el pensamiento de ciclo de vida, tales como la Economía circular y el nexo agua-energía-alimentos. En estos casos el ACV ha permitido medir la circularidad dentro de la filosofía economía circular y también agregar el componente ambiental en las evaluaciones del nexo entre recursos estratégicos y vitales como el agua, la energía, el ecosistema y el suelo (Zhang et al. 2018).

2. Herramientas basadas en el pensamiento de ciclo de vida

2.1. Tipos de herramientas

El pensamiento de ciclo de vida ha sido la filosofía y la base para el desarrollo de diversas técnicas, herramientas y metodologías. El ACV ha sido una de las herramientas pioneras que emergió de este pensamiento y debido a su carácter holístico, sistémico y riguroso, es actualmente la técnica más usada para evaluar los potenciales impactos ambientales de un determinado producto. Sin embargo, existen otras herramientas que también han surgido siguiendo las directrices del ACV, algunas de ellas se muestran la Figura 1 y se describen a continuación.

- **Huella de carbono:** se centra en calcular las emisiones de gases efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, clorofluorocarbonos) en las unidades de kgCO₂ equivalente. Dicho indicador presenta dos enfoques: (i) con enfoque corporativo u organización y el (ii) con enfoque de ciclo de vida (producto), los cuales se encuentran estandarizados bajo las normas ISO 14.064 e ISO 14.067, respectivamente (ISO 2013; ISO 14064-1 2006).

- **Huella hídrica:** es un indicador que visualiza la cantidad de agua consumida de forma directa o indirecta para la producción de bienes y servicios, expresándose en unidades de volumen por unidades de tiempo o unidades de producto (m³/año, m³/ kg producto) (Hoekstra, Chapagain, and Aldaya 2011). Actualmente están disponibles dos metodologías para la estimación de la huella hídrica: (i) La primera es la metodología desarrollada por Water Footprint Network (WFN) en el 2002, la cual considera diferentes métodos en función del tipo de agua como son: huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris (Hoekstra et al. 2011). La segunda metodología es la estandarizada por la ISO 14046:2014 (ISO 2014), con enfoque de ciclo de vida y presenta una visión más general de los problemas asociados al uso y contaminación del agua; es decir, está más orientado a los daños hacia la salud humana y la calidad del ecosistema producto de pérdidas y contaminación del agua.

- **Huella ecológica:** es una métrica que cuantifica la superficie necesaria para proveer los recursos y asimilar los desechos vinculados con la producción de bienes o servicios dentro del área geográfica determinada, es decir, mide cuánta naturaleza tenemos y cuánta naturaleza usamos en términos de hectáreas totales (gha) (Ewing 2010).

- **Análisis económico de ciclo de vida (ACVE):** permite calcular y gestionar todos los costos que están directamente relacionados con un producto a lo largo de su ciclo de vida; desde la extracción de recursos, cadena de suministro y disposición final. Además, considera los costos externos relevantes y los beneficios que se prevén privatizar (ejemplo, nuevo impuesto sobre las emisiones de CO₂). Esta herramienta es extremadamente útil para monitorear los costos en diferentes escenarios, haciéndolo atractivo para los clientes del producto y el sector financiero (Swarr et al. 2011).

- **Análisis de ciclo de vida social (ACVS):** tiene como objetivo evaluar los aspectos sociales y socioeconómicos de los productos y sus potenciales impactos a lo largo de su ciclo de vida. Esta metodología hace énfasis en los impactos que puede afectar directamente a las partes interesadas. Dichos impactos correlacionan el comportamiento de las empresas con los procesos socioeconómicos o sobre el capital social. Actualmente la UNEP/SETAC desarrolló una guía para aplicar el ACVS siguiendo las directrices de la ISO 14040 (Benoît et al. 2013). Dichas directrices han sido recientemente actualizadas y se pueden encontrar en: <https://www.lifecycleinitiative.org/just-published-the-guidelines-for-social-life-cycle-assessment-s-lca-of-products-2020/>

▪ **Análisis de la sustentabilidad del ciclo de vida:** nueva metodología transdisciplinaria que integra los tres pilares de la sostenibilidad: aspectos ambientales, económicos y sociales, y permite evaluar todos los impactos tanto positivos como negativos que apoyen la toma de decisiones hacia productos, sectores y economías más sostenibles (United Nations Environmental Program (UNEP) 2011).

Huellas Ambientales:



Métricas económicas, sociales y de sostenibilidad:



Figura 2. Herramientas basadas en el pensamiento de ciclo de vida.

2.2. Redes nacionales e internacionales de ACV

Junto al desarrollo y consolidación de la metodología de ACV, se han ido creando asociaciones internacionales que hoy son líderes en la temática, tales como: Life Cycle Initiative y La plataforma Europea de ACV.

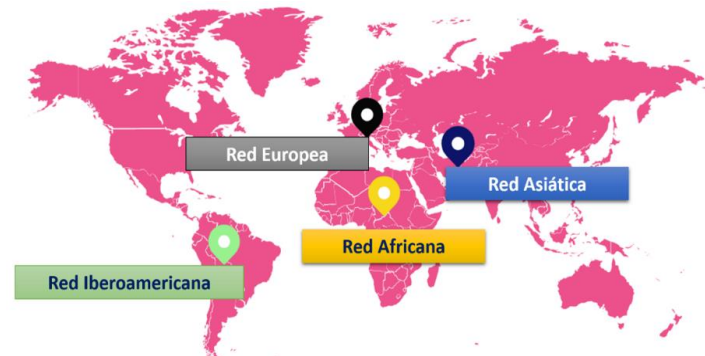


Figura 3. Principales redes regionales de ACV.

Al mismo tiempo se crearon grupos y redes colaborativas nacionales e internacionales como se visualiza en la Figura 2. En el caso particular de Latinoamérica, dichas redes además de promover el intercambio de conocimientos, el apoyo a estudios de casos, el aporte a mejoras metodológicas; su misión principal ha estado orientada al desarrollo de inventarios locales del ciclo de vida que representen las realidades específicas de cada región. La poca disponibilidad de inventarios de ciclo de vida locales constituye una de las principales limitaciones del ACV. Mayor detalle sobre las principales redes internacionales está disponible en www.lifecycleinitiative.org.

Dentro de la red regional Iberoamericana de ciclo de Vida se encuentran las siguientes redes nacionales:

- **Red ACV Chile (Chilean LCA network):**
<https://redacvchile.wixsite.com/acvchile>
- **Red Peruana de ACV y Ecología Industrial:**
<https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/sobre-la-red-ciclo-de-vida/presentacion/>
- **Red Mexicana de Ciclo de Vida:**
<https://redmexicanadeanalisedeciclodevida.wordpress.com/>
- **Red Argentina de Huella Hídrica (RAHH):**
<https://redargentinadehuellahidrica.wordpress.com/>
- **Asociación Brasileña de ACV (ABCV):**
<https://acv.ibict.br/sobre/quem-somos/>

2.3. Bases de datos y software de ACV

Llevar a cabo un ACV completo exige de muchos esfuerzos y tiempo, principalmente en la búsqueda de información y en el manejo y procedimientos de cálculos. En este sentido, también se han realizado importantes avances en el desarrollado de bases de datos y software de ciclo de vida.

Actualmente se dispone de varias bases de datos de inventarios de ciclo de vida comerciales y de libre acceso, que son reconocidas y aceptadas internacionalmente por su precisión, integridad y representatividad (Tabla 1). Estas proveen un conjunto de información relacionada a las entradas (recursos) y salida (residuos y emisiones) generados en un determinado proceso productivo. La información abarca procesos desde la extracción de combustible, minerales y biomasa, transporte, usos, tratamiento y disposición de residuos. El objetivo de estas bases de datos es facilitar la obtención de los inventarios en toda la cadena de valor de un determinado producto. A continuación se muestran algunas de estas bases de datos.

Tabla 1. Bases de datos de Inventarios de ciclos de vida comerciales y gratuitos.

Base de datos	Licencia	Página web
Ecoinvent	Comercial	https://www.ecoinvent.org/
European reference Life Cycle Database (ELCD)	Gratuita	https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/

Exiobase (IO database) GaBi	Comercial Comercial	https://www.exiobase.eu/ http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/
U.S. Life Cycle Inventory (LCI) Agro-footprint BUWAL 250	Gratuita Comercial Comercial	https://www.nrel.gov/lci/ www.agri-footprint.com http://svi-verpackung.ch/de/Services/Publikationen
EU and DK Input output library Danich food LCA	Gratuita Gratuita	http://www.lcafood.dk/

La creación de bases de datos de inventarios de ciclo de vida han venido acompañados de herramientas computacionales (Software) que facilitan el procesamiento de los datos, economizando tiempo y recursos. Estos softwares permiten integrar los inventarios disponibles en dichas bases de datos o creados por el usuario con los métodos de evaluación de impactos para generar un perfil ambiental de un determinado producto. Algunos de estos softwares realizan análisis de sensibilidad e incertidumbre. En la Tabla 2 se mencionan algunos de los softwares de ACV y sus proveedores.

Tabla 2. Software profesional de ACV y proveedores.

Softwares	Proveedores	Disponibilidad	Página web
Gabi software	Thinkstep	Comercial	www.gabi-software.com
SimaPro	PRé-Consultants	Comercial	www.pre.nl
Umberto	Ifeu-Institut	Comercial	www.ifu.com
Team 5.2	PwC France	Comercial	www.pwc.fr
Air.e LCA	Solidforest	Comercial	www.solidforest.com
iBalance	IKE Environmental Technology	Comercial	www.ike-global.com
REGIS	Sinum	Comercial	https://sinum.com/
openLCA	GreenDelta	Gratuito	www.openlca.org

2.4 Enfoques en el ACV

Tradicionalmente se distinguen dos tipos de enfoques para abordar el ACV, el ACV atribucional y ACV consecuencial (Finnveden et al. 2009; Weidema et al. 2019), los cuales a menudo pueden diferenciarse por su carácter "descriptivo" versus "orientado al cambio", respectivamente (Curran, Mann, and Norris 2005).

- El ACV atribucional (descriptivo) proporciona información sobre los impactos de los subprocesos considerados en el ciclo de vida de un producto, pero no considera los efectos indirectos (incremento en la demanda) que surgen de cambios en la salida del producto. Este enfoque permite realizar comparaciones entre los impactos directos de los productos y se utiliza para identificar las etapas críticas con posibilidades de mejoras a lo largo del ciclo de vida.
- El ACV consecuencial (orientado al cambio) describe los cambios de los flujos ambientalmente relevantes en respuesta a posibles cambios externos (por ejemplo, aumento o disminución de la demanda de algún producto). Tradicionalmente este enfoque es usado para la toma de decisiones en políticas públicas.

El enfoque atribucional es actualmente el más usado en el ACV, sin embargo, aún no existe un consenso de la pertinencia de uno y otro enfoque. Lo que sí se debe tener presente es que la elección de cualquiera de los enfoques implicarían diferencias en algunos aspectos metodológicos considerados en el ACV; como por ejemplo: la definición de unidad funcional, los límites del sistema, procedimiento de asignación de cargas ambientales para proceso multi-productos, los tipos de datos (promedios y marginales) en el modelado de subsistemas del ciclo de vida, niveles de incertidumbre y la elección de métodos evaluación de impactos ambientales (Brander et al. 2008; Rebitzer et al. 2004). Dichas diferencias también implicarían diferencias en los resultados y conclusiones en los estudios de ACV.

Indistintamente de las diferencias entre dichos enfoques, ambos también pueden ser usados para estudios retrospectivos (situaciones previas o cambios/decisiones que ocurrieron en el pasado) y prospectivos (situaciones o cambios / decisiones futuras) (Curran et al. 2005; Rebitzer et al. 2004). Sin embargo, los estudios prospectivos se le atribuyen principalmente al ACV consecuencial.

2.5 Marco normativo del ACV

Las metodologías del ACV se basan en estándares desarrollados por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental y la Organización Internacional para la Normalización (ISO), conocidas como serie ISO 14040, en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14000. Las cuales se han ido actualizando, armonizando y agrupando desde su conceptualización hasta generar un marco normativo estandarizado (ver Figura 3). Actualmente el marco metodológico vigente para la evaluación de ciclo de vida se rige por las normas ISO 14040 y 14044 (2006), las cuales permi-

ten disponer de terminologías estandarizadas, requisitos y directrices para realizar un ACV.

- ISO 14040 (2006): Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Principios y marco de referencia.
- ISO 14044 (2006): Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Requisitos y directrices.

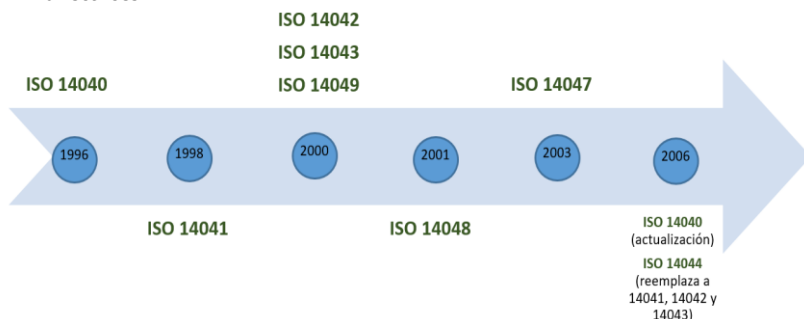


Figura 4. Evolución temporal del marco normativo. ISO 14041: Definición de objetivo y alcance y análisis de inventario. ISO 14042: Evaluación de impactos de ciclo de vida. ISO 14043: Interpretación de ciclo de vida. ISO 14047: Reporte técnico. (Fuente: elaboración propia).

3. Metodología de ACV

La metodología de ACV según la norma ISO 14040 y 14044 (ISO 2006; ISO 14040 2006) está estructurada por 4 fases como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Fases de la metodología de ACV (Fuente: adaptado desde la ISO 14044 - ISO 2006)

A continuación se realiza una breve descripción de cada una de dichas fases.

a) Definición de objetivo y alcance.

Con el objetivo y alcance se define el propósito y la extensión del estudio, de modo que sea posible: describir el sistema a estudiar, su función y elegir la unidad funcional (medida de referencia del estudio); definir los límites de este y extensión geográfica; establecer la metodología de evaluación de impacto a utilizar y las limitaciones del estudio. Algunos de los aspectos claves requeridos en esta fase son: la definición de unidad funcional, límites del sistema y las reglas para asignación de cargas ambientales.

- **Unidad funcional (UF):** se refiere a una unidad de referencia que describe y cuantifica el desempeño de un determinado producto, esta puede ser de tipo físico y de tipo funcional:
- **Tipo físico:** es la medida física que caracteriza el producto. Ejemplo para sistemas energéticos pudiera estar definida las unidades de MJ, kWh, MJ/h, etc. Para sistemas no energéticos se pueden definir unidades másicas (kg, kg/h), volumétricas (litros, m³, litros/h), distancia recorrida (km recorrido es común para bio-combustibles, etc), entre otras.
- **Tipo funcional:** representa la funcionalidad que cumple el producto. Para los sistemas energéticos podría definirse en unidades de energía (kWh), incluso con diferentes fines: iluminación, calefacción, etc. Por lo tanto, en estos casos la UF tipo funcional, pudiera definirse como: las horas de iluminación, horas de calefacción, cantidad de energía en forma de calor, etc. Otras unidades tipo funcional pudieran ser superficie pintada, aporte nutricional, durabilidad, resistencia térmica, entre otras. Esta es recomendada para comparar diferentes productos con la misma funcionalidad. Si se define UF tipo funcional se requerirá adicionalmente determinar el flujo de referencia. Este flujo de referencia representa la cantidad necesaria de producto para satisfacer la función deseada. Por ejemplo, la cantidad de electricidad consumida para garantizar determinadas horas de iluminación o de calefacción (Ver Figura 6).

Ejemplo: Producir energía eléctrica

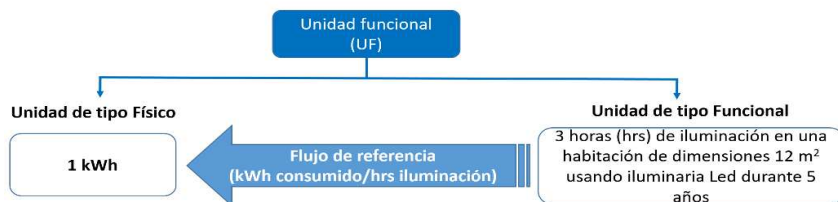


Figura 6. Ejemplificación de la unidad funcional y flujo de referencia (Fuente: elaboración propia).

Límites del sistema.

Realizar un ACV completo puede resultar muy extenso. Por esta razón se deben establecer límites a los sistemas. Los límites determinan qué procesos unitarios se deben incluir dentro del ACV. No necesariamente se debe considerar todos los flujos y etapas a lo largo del ciclo de vida de un determinado producto, se pueden excluir aquellas que no modifiquen significativamente las conclusiones del estudio. Los límites del sistema se pueden clasificar en función de las etapas a considerar dentro de la cadena de valor de producto como se muestra en la Figura 7. Estos se definen de la "puerta a puerta", "cuna a puerta", de la "cuna a tumba", "cuna a cuna".

Específicamente para procesos bio-energéticos, las etapas a considerar dentro de los límites del sistema dependerán de la ruta energética a estudiar. Actualmente, existen diversas rutas bioenergéticas, las cuales cambian en función del origen de la biomasa (biomasa agrícola y forestal, residuos derivados de aserraderos, etc), la tecnología (combustión, co-combustión, gasificación, pirólisis, etc) y su uso final (bio-oil, electricidad, calor etc).

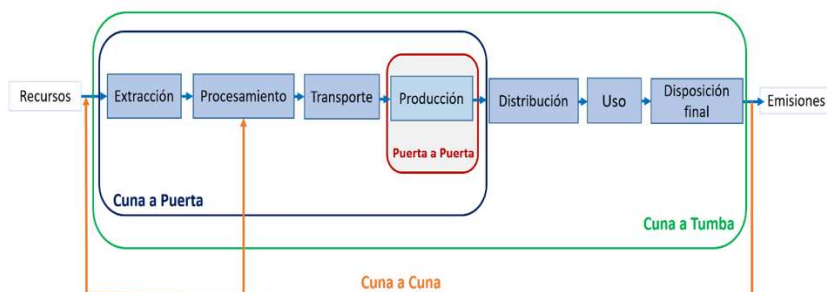


Figura 7. Posibles límites de sistema en el ACV (Fuente: elaboración propia).

Reglas de asignación de cargas ambientales:

Este procedimiento se aplica cuando en cualquiera de las etapas del ciclo de vida se generen dos o más productos. En la ruta bioenergética pudieran existir diferentes etapas dentro del ciclo de vida que pudieran clasificarse como multi-productos, tales como:

- El propio proceso de producción de electricidad, viene acompañado de calor.
- El uso de residuos, ya sean provenientes de los procesos agrícolas, manejo forestales, así como, proveniente de procesos de tratamiento de la madera (aserraderos), también se pueden clasificar como multi-productos. En dichos casos los residuos se convirtieron en un co-producto adicional al proceso junto con los productos principales (granos de trigo, trozas, madera aserrada, etc).
- Desde la pirólisis rápida se obtiene como producto principal el bio-oil y como co-producto el biochar. Este último puede ser usado como fertilizantes y enmendador de suelo (Yang et al. 2020).

En tales situaciones donde se genere más de un producto, se deben aplicar las reglas de asignación de cargas ambientales a través de criterios físicos, ya sean másicos, económicos o energéticos. Esto significa que se están distribuyendo el consumo de recursos, cantidad de emisiones y por consiguiente, los impactos ambientales generados entre los productos y co-productos obtenidos.

Para el proceso energético ilustrado en la Figura 8, se debe aplicar la distribución de cargas ambientales entre la electricidad y el calor. En este caso, se aplicarán criterios energéticos debido a que ambas corrientes de salida son flujos de energía. Sin embargo, también se pudieran usar criterios económicos.

Si hipotéticamente se produce 1 kWh de electricidad y 4 kWh de calor, el factor de distribución de cargas (felec) para la electricidad se calcula usando la siguiente expresión:

$$F_{\text{electricidad}} = \frac{\text{Electricidad}}{\text{Electricidad} + \text{Calor}} = \frac{1 \text{ kWh}}{1 \text{ kWh} + 4 \text{ kWh}} = 0,2$$

Los recursos consumidos y las emisiones generadas son afectados por dicho factor, es decir, el 20% de la biomasa alimentada (0,1 kg) y las emisiones de CO₂ emitidas (0,02 kg) corresponden al producto Electricidad. El restante 80% es asociado a la producción de calor.

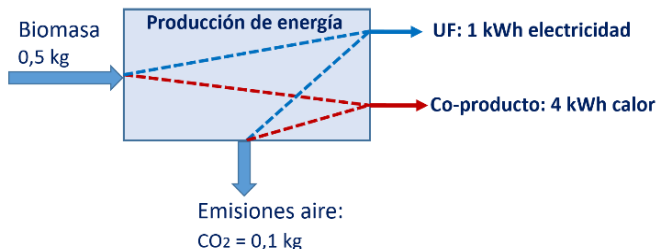


Figura 8. Distribución de cargas ambientales para un sistema energético hipotético (Fuente: elaboración propia).

Según los lineamientos generales de la Norma ISO 14040-14044 (2006) se recomienda evitar la distribución de cargas ambientales mediante dos opciones:

- La división del proceso en subprocesos: este se puede realizar cuando los datos se pueden recopilar para los subprocesos por separado.
- La extensión de los límites del sistema. Se extiende los límites del sistema adicionando al sistema en estudio las funciones de los co-productos; es decir, se evitaría las cargas ambientales de un determinado proceso alternativo que se encuentra fuera

de los límites del sistema que produzca el mismo co-producto. En tales situaciones los co-productos son denominados Productos evitados.

Ejemplificando a través de un proceso de producción de energía como se muestra en la Figura 9, se puede identificar que la UF es 1 kWh electricidad y el calor es un co-producto. En este caso, se extenderán los límites del sistema adicionando el proceso alternativo de producción de calor a partir de carbón que producirá la misma cantidad de calor (4 kWh). Este procedimiento se entenderá como: los impactos ambientales asociados a la obtención de calor desde carbón serán evitadas, es decir, se le restarán a los impactos totales del sistema de producción de energía.

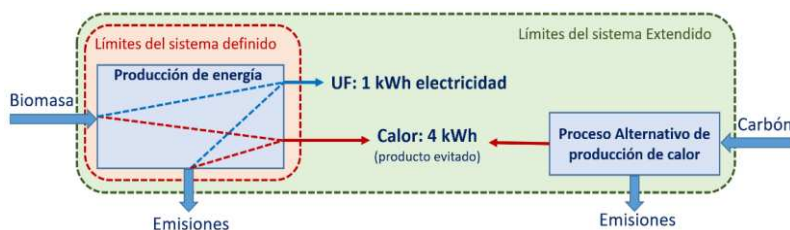


Figura 9. Ejemplo hipotético de extensión los límites del sistema para un proceso energético multi-producto (Fuente: elaboración propia).

b) Análisis de inventario.

En la etapa del Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV) se compilan los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema tomando como referencia la unidad funcional. En la práctica, el ICV es una lista de emisiones y recursos utilizados.

El levantamiento de la información es una etapa crítica dentro del proceso de evaluación ambiental y debe garantizar la sistematicidad y actualización continua de los datos del inventario. La representatividad de los inventarios de los recursos y emisiones depende principalmente de la calidad, cantidad y detalle de información disponible. Se distinguen dos tipos de fuentes de información para la obtención de los datos: Datos primarios y secundarios.

- Los datos primarios estarán relacionados específicamente al proceso en estudio, es decir, información real de los procesos energéticos y sus respectivas etapas dentro del ciclo de vida.
- Los datos secundarios son recogidos utilizando reportes, artículos científicos, conocimientos de expertos, estadísticas, legislaciones, bases de datos internacionales de inventarios de Ciclo de vida (Ver tabla 1).

Es importante que los datos cumplan con los indicadores de calidad (DQIs, por sus siglas en inglés) necesarios para una interpretación fiable de los resultados y la credibilidad del estudio. Para ello se deben tener en consideración los siguientes aspectos al momento de manejar los datos (Sonnemann et al. 2013; Weidema et al. 2019):

Fiabilidad: conocer la medida de la variabilidad de los valores de los datos, análisis de la incertidumbre de la información recogida, especificar el porcentaje del flujo que se ha medio o estimado.

Representatividad: se refiere a como la información refleja la situación real del estudio, es decir, la cobertura geográfica, período de tiempo en que se han recogido los datos y la cobertura tecnológica de estos.

Correlación Temporal: tiempo transcurrido desde que se recoge la información hasta su publicación.

Correlación Geográfica: los datos deben corresponder con la instalación objeto de estudio, casos generales del país o a procesos similares.

Correlación Tecnológica: es importante especificar la tecnología correspondiente a cada proceso unitario o si responden a condiciones similares o diferentes de operación. Se recomienda aplicar los mismos procedimientos de cálculo de forma coherente a lo largo de todo el estudio.

Finalmente, la coherencia de los resultados se pueden comprobar con otras fuentes, muestreo, comparación teórica con los resultados de los balances de masa y energía o procesos similares (Henriksson et al. 2014).

c) Evaluación de impactos.

En la fase de evaluación de impactos se evalúa el potencial impacto ambiental asociado a los recursos consumidos y emisiones generados al agua, aire y suelo derivados desde el inventario. Este procedimiento se realiza utilizando mecanismos y modelos de evaluación de impactos según se ilustra en la Figura 10. Los métodos existentes de evaluación de impactos se clasifican en dos niveles función del lugar en que se sitúan los indicadores de las categorías en la cadena causa-efecto (Bare et al. 2000), es decir, en: "puntos intermedios (midpoint)" y "puntos finales (endpoint)".

Puntos intermedios (midpoint). Están orientados a la causa que produce el impacto, es decir, a los contaminantes emitidos desde los procesos y se pueden identificar porque las unidades están en función de una sustancia de referencia. Por ejemplo, la categoría de impacto calentamiento global sus unidades son unidades música CO₂ equivalente (kgCO_{2eq}), acidificación se expresará en kg SO_{2eq}, etc). Es importante destacar, que cada método de evaluación de impacto definirá sus categorías de impactos, así como sus respectivas unidades; los cuales pueden ser coincidentes o no entre métodos.

Punto final (Endpoint). Estos métodos están orientados a los daños que ejerce cualquier contaminante o uso de recursos sobre la salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos. En este caso, las categorías de impactos pueden coincidir con las de los métodos a nivel de punto intermedios, sin embargo las unidades son diferentes. Por ejemplo, la categoría de impacto calentamiento global se expresará en DALY (DALY→Disability-Adjusted Life Year, representa los años de vida ajustados a una discapacidad), unidad que representa el impacto sobre la salud humana si se emite cierta cantidad de CO₂.

De la misma manera sucede con la categoría de impactos acidificación y eutrofización que están orientadas a los daños asociados a las especies de un ecosistema, las cuales se expresan en (PDF/m²año) (PDF→Potentially Disappeared fraction, representa el potencial de desaparición de especies de plantas en el ecosistema por año y superficie).

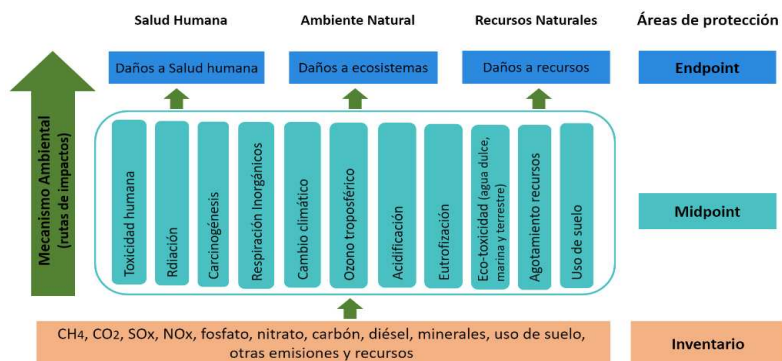


Figura 10. Clasificación de los indicadores de categoría de impactos, Nivel punto intermedio (midpoint) y nivel de punto final (endpoint). (Fuente: traducido desde EUR-COMMISSION 2010).

Existen múltiples métodos para la evaluación de impactos ambientales como se puede visualizar en la Tabla 3. Sin embargo, aún no existe un consenso generalizado sobre cuál es la más adecuada para procesos energéticos. La preferencia de un método respecto a otro dependerá de los objetivos y propósitos de cada estudio.

Según plantea la ISO 14044 (ISO 2006), la fase de evaluación de evaluación de impactos considera elementos obligatorios y opcionales. Los elementos obligatorios permiten obtener como resultado en perfil ambiental de ciclo de vida de cualquier producto según se muestra en la Figura 11.

Tabla 3. Métodos de evaluación de impactos ambientales según su clasificación. Extraído desde el software profesional SimaPro.

Punto intermedio (Midpoint)	Punto final (Endpoint)	Mixtos (midpoint/endpoint)
CML-IA	Ecological scarcity 2013	ReCiPe mid/ ReCiPe end
EDIP 2003	EPS 2000	Water footprint:
EDD 2013	Eco-indicator 99	Boulay et al 2011 (WE) / Boulay et al 2011 (HH)
ILCD 2011	IMPACT 2002+	Pfister et al 2009 (WE)/ Pfister et al 2009 (ReCiPe, Eco-indicator 99)
BEES*+		
TRACI 2.1		
Cumulative energy demand		
Cumulative Exergy demand		
Ecological footprint		
Ecosystem Damage potential		
Greenhouse gas protocol		
IPCC 2013		
USEtox		

WE → water scarcity y HH → Human Health

Los elementos obligatorios describen tres etapas:

- **Selección:** se seleccionan las categorías de impacto y modelos de caracterización. Las categorías de impactos estarán definidas en función de los métodos de evaluación de impactos mencionados en la Tabla 3. Es decir, si se selecciona el método CML significa que las categorías de impactos a evaluar serán las definidas en dicho método. Sin embargo, no es necesario considerar todas las categorías de impactos, se pueden excluir aquellas que no sean relevantes para un determinado caso de estudio. También se pueden combinar diferentes modelos de evaluación de impactos.
- **Clasificación:** Se le asignan los resultados del inventario a las categorías de impacto seleccionadas. Cada modelo de evaluación de impacto especificado previamente va a permitir clasificar las emisiones con sus respectivos impactos. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ y CH₄ contribuyen a la categoría de impacto "Calentamiento global". Al mismo tiempo, una misma sustancia puede contribuir a varias categorías de impactos a la vez, tales como las emisiones de NO_x y SO_x que inciden tanto en la eutrofización, la acidificación como la toxicidad.

- Caracterización:** se realiza el cálculo del indicador resultante por categoría de impacto. A cada contaminante se le asigna un impacto potencial en la categoría de impacto en estudio, los cuales se denominan los factores de caracterización (POTENCIAL) de una sustancia. Dichos potenciales impactos son referidos a una sustancia de referencia, ejemplificando para el potencial de acidificación establecido por el modelo CML, esta sustancia de referencia es 1 kg de emisiones de SO₂ (Ver Figura 11). Los factores de caracterización para cada categoría de impactos son específicos para cada método de evaluación de impacto seleccionado (CML, IMPACT+ 2002, eco-indicator 99, entre otros).

ELEMENTOS OBLIGATORIOS

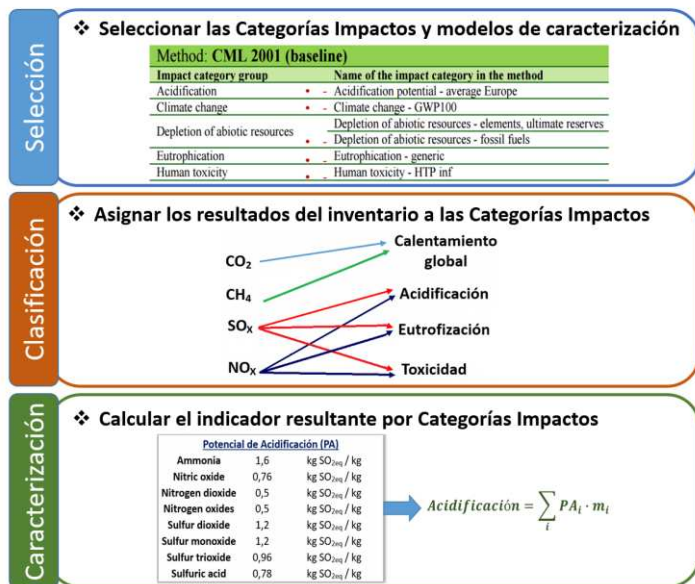


Figura 11. Elementos obligatorios dentro de la fase de Evaluación de impactos ambiental (Fuente: elaboración propia).

El perfil ambiental obtenido siguiendo los pasos establecidos anteriormente, permite identificar por categorías de impactos las etapas dentro del ciclo de vidas más impactantes; sin embargo, no permite identificar la relevancia de una categoría de impacto con respecto a otra. Esto se debe a que las categorías de impactos presentan diferentes unidades; es por ello que se recomienda aplicar los elementos opcionales dentro de la fase de evaluación de impactos ambientales.

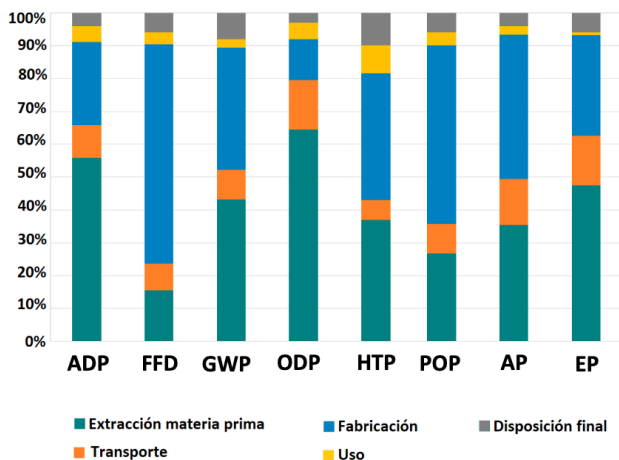


Figura 12. Ejemplo de perfil ambiental. ADP (Agotamiento de recursos), FFD (Agotamiento de combustibles fósiles), GWP (calentamiento global), ODP (Deterioro de la capa de ozono), HTP (Toxicidad humana), POP (Oxidación fotoquímica) AP (Acidificación), EP (Eutroficación). (Fuente: elaboración propia).

Los elementos opcionales son:

- **Normalización:** se utiliza para verificar si hay inconsistencias, para proporcionar y comunicar información sobre la importancia relativa de los resultados de las categorías de impactos calculados respecto a un valor referencial. Constituye la base para procedimientos adicionales, tales como, ponderación e interpretación de los resultados.
- **Agrupación.** Una vez ponderado las categorías de impactos se agrupan en sus respectivas categorías de daños (Salud Humana, Calidad Ecosistema, y Daños a los recursos).
- **Ponderación.** Los resultados normalizados para cada categoría de impacto se les asignan factores numéricos de acuerdo con su importancia relativa. Los factores de ponderación están relacionados con los factores de normalización de referencia, los cuales a su vez están en función de una determinada área geografía. Tanto los factores de normalización como los de ponderación son específicos para cada modelo de evaluación de impacto (IMPACT+ 2002, eco-indicator 99, entre otros).

d) Interpretación

La interpretación es la fase en la que se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto. Los resultados de esta interpretación adquieren la forma de

conclusiones y/o recomendaciones para la toma de decisiones. En esta fase se deben tener en cuenta tres aspectos claves:

1 Identificar los aspectos más representativos en el análisis que pudieran ser mejorados, como por ejemplo:

- Los datos de los inventarios (energía, emisiones, residuos).
- Proceso dentro del ciclo de vida del producto que generen las principales cargas ambientales.
- Categorías de impactos críticas (eutrofización, calentamiento global, etc).

2 La etapa de evaluación, donde se establece las bases para la elaboración de las conclusiones y formular recomendaciones. Para ello se requiere de la verificación de los siguientes aspectos:

- Comprobación de la integridad: esta asegura que se ha utilizado toda la información y datos requeridos de todas las fases y que están disponibles para la interpretación. La Integridad asegura que no se ha olvidado ningún aspecto importante conocido.
- Comprobación de sensibilidad: intenta determinar cómo las variaciones en las suposiciones, métodos y datos influyen sobre los resultados; es decir, ver la relevancia en la evaluación ambiental para cuando varían variables operacionales del proceso (eficiencia energética, distancia transporte biomasa, rendimientos, etc) y consideraciones metodológicas (límites del sistema, regla de asignación de cargas etc).
- Comprobación de la Coherencia: investiga si las suposiciones, los métodos y los datos han sido aplicados consistentemente durante todo el estudio.
- Comprobación de la incertidumbre: cuantifica las incertidumbres sobre la subjetividad en las consideraciones de los modelos utilizados y la exactitud en los datos de entrada.

Las *incertidumbres* relacionadas a los modelos se pueden analizar mediante los siguientes métodos:

- Distribuciones de probabilidad/intervalos de confianza
- Simulaciones de Monte Carlo (Ewertowska et al. 2017)
- Métodos analíticos basados en la propagación de errores
- Teoría de conjuntos difusos, etc.

Los métodos usados para abordar la incertidumbre de los datos dependerán de la población de datos:

- Si la población de datos del inventario son suficientes se aplicarán métodos estadísticos como parte de los métodos numéricos.
- Si la población de datos es insuficiente se aplicará el método simplificado, mediante el uso de la Matriz de Pedigree (Ciroth et al. 2016).

3. Conclusiones y recomendaciones: básicamente se plantean las principales conclusiones del estudio resaltando los resultados más significativos en función del objetivo y el alcance. Al mismo tiempo se proponen recomendaciones en base a información

ambiental adicional que no ha sido evaluado en su estudio, así como, proponer mejoras (hacer cambios, etc). En este último aspecto se recomienda demostrar y medir el sistema mejorado.

La norma ISO 14040 indica que es recomendable llevar a cabo una evaluación crítica a cargo de expertos independientes, ya que teniendo en cuenta las cantidades de materiales, flujos energéticos y emisiones que se manejan, se pueden cometer errores significativos.

4. Desafíos en la metodología de ACV

A pesar de los numerosos estudios y publicaciones sobre la aplicación de la metodología de ACV, aún quedan varios aspectos metodológicos que deben ser mejorados. Algunos de los desafíos que actualmente nos podemos encontrar por cada fase dentro de la metodología de ACV describen a continuación (Reap et al. 2008).

Definición de objetivos y alcance:

- Aún resulta complejo definir los límites del sistema y si aplicar o no la expansión del sistema es la opción más apropiada, principalmente por la variabilidad de los objetivos en los estudios. Por lo tanto, se deben realizar más esfuerzos en este tema, con más estudios de caso y, sobre todo, mediante el desarrollo de directrices y procedimiento.
- Algunas de las simplificaciones son a menudo demasiado restrictivas, en particular para su aplicación a escala meso (análisis de, por ejemplo, tratamiento de residuos, sectores industriales, etc.) y macroescala (por ejemplo, complejo sistemas tecnológicos).

Análisis del inventario:

- Al momento de aplicar las reglas de asignación de cargas ambientales para procesos multi-productos, se dificulta identificar con claridad qué enfoque de asignación de cargas ambientales es el más apropiado en diferentes casos y cómo identificar el enfoque más apropiado para la asignación.
- La introducción del tiempo en los inventarios de ciclo de vida, para obtener inventarios dinámicos. Actualmente las modelaciones se realizan de forma estática, lo que dificulta realizar proyecciones futuras.
- La disciplina económica del análisis de insumos y productos (Input-Output) ha contribuido al fortalecimiento de los inventarios de ciclo de vida. Dichos modelos son relativamente sencillo y las herramientas necesarias están fácilmente disponibles; sin embargo, todavía es necesario más investigación sobre fiabilidad e incertidumbre de los datos.
- Aún persisten las dudas de cómo abordar adecuadamente el enfoque consecuencial en el ACV, principalmente con la identificación de qué tipo de efectos marginales (a corto o largo plazo) deben ser incluido y cómo identificar la tecnología marginal.

Evaluación de impactos ambientales:

-
- Se requiere de factores de caracterización espacialmente diferenciados para algunas categorías de impacto (ejemplo, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, entre otras).
 - Mejorar los enfoques existentes para algunas categorías de impacto (por ejemplo, mediante la comparación de diferentes modelos) en particular toxicidad humana y ecológica, agotamiento de recursos, etc.
 - El desarrollo de Métodos de evaluación de impactos orientados al daño, que apunten a una interpretación más fácil de los resultados del ACV.
 - Desarrollo de métodos mixtos que indistintamente provean indicadores a nivel puntos intermedios y puntos finales, ya que estos ofrecería mayor flexibilidad en la elección del método en función del objetivo y la aplicación del estudio.
 - Desarrollo de nuevos métodos de caracterización y nuevas categorías de impacto. Por ejemplo, enfoques de evaluación de riesgos (RA) en conjunto con ACV, la inclusión de categoría de impacto "ruido" en los actuales métodos de evaluación de impactos.
 - En lo que respecta a la inclusión del uso del agua, el indicador que se utiliza a menudo es el consumo total de agua (kg o m³); sin embargo, no es adecuada para evaluar los recursos hídricos de una perspectiva de la sostenibilidad.
 - La necesidad de explorar conjunto de datos de normalización con diferenciaciones regionales.

Interpretación:

La evaluación de la calidad de los datos y el análisis de incertidumbre (parámetro, modelo y escenario) han sido identificados como elementos influyentes para garantizar la credibilidad y confiabilidad de los estudios de ACV, sin embargo, muchas veces estos aspectos no son abordados. En por ello que se necesita más orientación en términos de directrices sobre la definición de incertidumbre tanto en los datos del inventario como en los modelos de evaluación de impactos. Al mismo tiempo, generar un mayor número de estudios de caso que puedan ser usados como ejemplos.

La mayoría de los elementos metodológicos destacados anteriormente, se aplican en mayor o menor medida en la cuantificación de los impactos asociados a procesos de aprovechamiento energético de residuos lignocelulósicos. En las siguientes secciones se presenta un caso de estudio asociado al uso de biomasa forestal con fines energéticos: CASO: Sistema torrefacción-co-combustión para la sustitución de carbón en plantas generadoras de electricidad en Chile.

5. Caso de estudio. Biomasa torrefactada como sustituto de carbón en aplicaciones de co-combustión.

La descarbonización de la matriz eléctrica chilena es uno de los objetivos estratégicos de la agenda para el desarrollo sostenible en Chile. En ese sentido el país se ha comprometido a cumplir con los acuerdos tomados en el marco de su "Contribución Nacional para el Acuerdo Climático de París de 2015", a través de una reducción de sus emisiones de GEI en un 30% por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) al año 2030, con respecto al año 2007. Dicha estrategia país tiene un importantísimo impacto en el sector energético, el

cual es responsable del 78% de las emisiones de GEI. Una de las iniciativas más ambiciosas en esta línea es la descarbonización de la matriz eléctrica que supone a 2024 haber sacado de operación los primeros 1047 MW correspondientes a las 8 plantas a carbón más antiguas del país.

En este marco, el uso de biomasa como sustituto del carbón parecería ser una alternativa prometedora para cumplir con los objetivos planteados, reduciendo los efectos sociales de cerrar estas instalaciones. Sin embargo, utilizar biomasa en calderas diseñadas para operar con carbón implica varios desafíos, por ejemplo:

- 1- Incrementar la **densidad energética** de la biomasa (favorece la cadena logística y la eficiencia de ciclo).
- 2- Modificar la **estabilidad de la biomasa** a su exposición ambiental, reduciendo su capacidad higroscópica, su estabilidad biológica, etc.
- 3- Mejorar la **facilidad de moler** la biomasa para su uso en calderas de carbón pulverizado.

Estas características permitirán compatibilizar ambos combustibles (biomasa y carbón) y facilitarían la transición entre estos con un mínimo de modificaciones técnicas. Por tanto, para superar estos desafíos que son intrínsecos de la biomasa, deben implementarse tecnologías de pre-tratamiento.

La torrefacción es un pretratamiento termoquímico, mediante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente a medida que esta se calienta (<50°C/min) hasta 200–300°C. Durante el proceso, la hemicelulosa, celulosa y, en menor grado la lignina, se degradan. La remoción de la humedad, la despolimerización de la hemicelulosa y la descomposición de la lignina son los fenómenos físicos y químicos que controlan el proceso y hacen que las relaciones atómicas O/C y O/H del sólido se asemejen a las del carbón. Como resultado se obtiene un producto sólido hidrofóbico, bio-resistente, fácil de triturar y que retiene entre 70-90% del poder calorífico de la biomasa sin tratar, en menos del 80% de su peso. Además, se genera una corriente de compuestos volátiles orgánicos (ácidos carboxílicos, fenoles, metanol, etc.) y gases permanentes (CO₂, CO e H₂) (Nocquet et al. 2014; Prins, Ptasinski, and Janssen 2006).

A pesar de las indiscutibles ventajas técnicas de la biomasa torrefactada, su implementación requiere de un análisis de aspectos ambientales que permitan elucidar su carácter de combustible sostenible. En las siguientes secciones se presenta, a modo ilustrativo, un caso de estudio que considera el uso de biomasa lignocelulósica torrefactada para la generación de electricidad en calderas a carbón.

Objetivos y alcance del estudio

El uso de mezclas carbón-biomasa (cofiring) es una alternativa simple y de bajo costo para aprovechar los residuos forestales como combustibles para la producción de electricidad en Chile. Además, esta estrategia permite transitar de un combustible a otro de manera paulatina, e incorporando las modificaciones tecnológicas, regulaciones de mercado y ambientales que faciliten dicha transición. Tomando en consideración lo anterior,

se define como objetivo del ACV comparar procesos para la producción de energía utilizando biomasa como sustituto de carbón en centrales eléctricas. Se analizan dos escenarios, y se comparan utilizando un enfoque de la cuna a la puerta:

- **Escenario I:** Uso de mezcla de carbón con 20% (base energética) de pellets de madera sin tratar.
- **Escenario II:** Uso de mezcla de pellets de madera torrefactada con carbón con el mismo porcentaje de sustitución.

La elección de ambos escenarios está en línea con la estrategia de descarbonización y además, permite cuantificar el beneficio o carga ambiental que supone el proceso de torrefacción. Por lo tanto, estos escenarios se comparan con centrales eléctricas de carbón instaladas en Chile (caso base) según las categorías de impacto incluidas en el modelo CML 2000.

Límites del sistema

Los límites del sistema de generación de electricidad con carbón y biomasa, se definen de la cuna a la puerta y se representan en la Figura 12.



Figura 12. Límites del sistema para ACV (Fuente: elaboración propia).

La cadena de producción de biomasa incluye producción, recolección, transporte, peletización, combustión y generación de electricidad. En el caso de la biomasa torrefactada, los límites se extienden (área de líneas discontinuas) hasta la planta de torrefacción. Se utilizó *Pinus radiata* como referencia para estimar los impactos del proceso de producción forestal que incluyó el establecimiento de plantaciones, poda y raleo. Los límites de la cadena de carbón incluyen la producción y el transporte de carbón integrados a la combustión y la producción de electricidad.

Unidad Funcional. Como unidad funcional se utilizó un kilovatio-hora de electricidad (kWh) en la puerta de la planta. Esta unidad es común e independiente de la tecnología de generación utilizada.

Localización de los casos y aproximaciones.

El análisis se realizó en la VIII Región (Biobío) de Chile, donde se ubica cerca del 40% de las plantaciones forestales según el catastro reportado por CONAF con actualización a 2017 (www.conaf.cl). Por tanto, el ACV considera que toda la biomasa fue producida, pretratada y utilizada dentro de la VIII Región. El inventario para la torrefacción se obtuvo a partir de los reportes publicados por la UDT-Chile. Se usaron con este fin resultados de experimentos a escala piloto para la torrefacción y se escalaron hasta 250 GWth para estimar la composición y las condiciones de las emisiones gaseosas, líquidas y sólidas. Con respecto a la combustión, se asumió que el 20% de la sustitución del carbón por biomasa no tendría un efecto significativo en la eficiencia. Los detalles específicos de las plantas y sus condiciones operacionales se encuentran disponibles en (Arteaga-Pérez et al. 2017; Arteaga-Pérez, Segura, et al. 2015).

Inventarios.

- **Carbón:** Los datos sobre la cadena de suministro de carbón se obtuvieron de un trabajo previo realizado por los autores Fondef D06I1060, donde se encuentra una base de datos completa para el Inventario de Ciclo de Vida de la producción y distribución de electricidad chilena en el período 1995-2011 (Vega, M, Zaror 2011; Vega, M. Zaror 2011).
- **Biomasa:** Aquí se utilizaron datos primarios para el cultivo, la recolección y el transporte de madera de pino. El proceso de plantación se lleva a cabo mediante un manejo intensivo según se describe en (Arteaga-Pérez, Vega, et al. 2015). Este proceso incluye la preparación de tierras, control de maleza, fertilización, siembra de la plántula, manejo de la plantación y cosecha posterior a un periodo de crecimiento entre 18-25 años. El inventario de este proceso se puede encontrar en una de las publicaciones de los autores (Arteaga-Pérez, Vega, et al. 2015).
- **Torrefacción:** Los flujos de materia y la composición de las emisiones en la torrefacción y peletización de biomasa se evaluaron basándose en los resultados experimentales de la planta piloto descrita en las secciones anteriores. Los impactos del pre-secado y recirculación de volátiles se incluyeron en los inventarios de torrefacción. Además, se utilizaron simulaciones con el software AspenOne v.8.6 para completar la información necesaria del proceso (Arteaga-Pérez et al. 2017; Arteaga-Pérez, Segura, et al. 2015).
- **Co-combustión:** Este análisis se basó en los actuales esquemas chilenos para la producción de electricidad a partir del carbón, e incluyó las siguientes opciones: (i) plantas de carbón, (ii) carbón de carbón/pelets de pino sin tratar y (iii) carbón/ pelets de pino torrefactados. La eficiencia eléctrica neta se fijó en 30% según datos facilitados por empresas termoeléctricas locales (Vega, M, Zaror 2011; Vega, M. Zaror 2011).

Los resultados detallados de los inventarios se reportaron en (Arteaga-Pérez, Vega, et al. 2015).

Evaluación de Impactos.

La evaluación de impactos se desarrolló según 10 de las categorías incluidas en el método CML 2 Baseline 2000 v2.05/World 1995 y los resultados se presentan en la Figura 13. Estas categorías de impacto fueron las que se habían informado previamente como críticas para estos procesos (Benetto et al. 2004; Cambero and Sowlati 2014; Faé Gomes et al. 2013; Tsalidis et al. 2014).

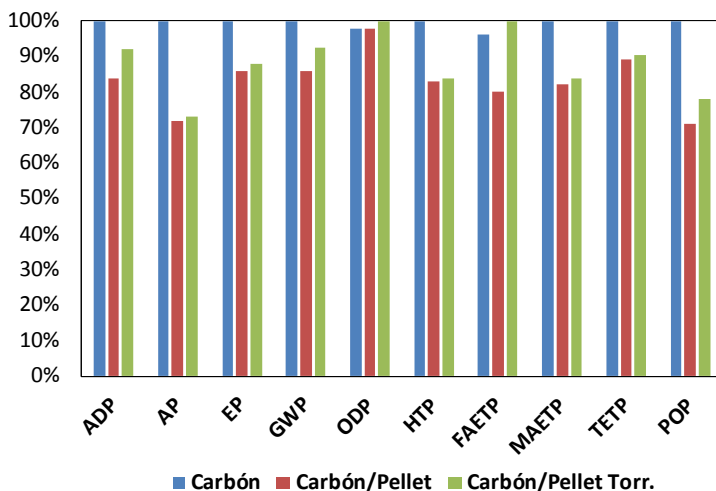


Figura 14. Impactos ambientales normalizados para los tres escenarios estudiados según el método CML 2 Baseline 2000 v2.05/World 1995. ADP (Agotamiento de recursos), AP (Acidificación), EP (Eutroficación), GWP (calentamiento global), ODP (Deterioro de la capa de ozono), HTP (Toxicidad humana), FAETP (Ecotoxicidad de cuerpos acuíficos dulces), MAETP (Ecotoxicidad marina), TETP (Ecotoxicidad terrestre), POP (Oxidación fotoquímica). (Fuente: elaboración propia).

Como se muestra en la Figura 14, un reemplazo de 20% del carbón con pellets de madera o pellets torrefactados, para la producción de electricidad en plantas de carbón, implica una reducción en la mayoría de las categorías de impacto analizadas. La ADP para biomasa sin tratar y torrefactada por cada kWh disminuye en un 16% y un 7%, respectivamente, en comparación con el carbón. Esto está estrechamente relacionado con la renovabilidad de la biomasa. En el caso del pino torrefacto se debe agregar una pequeña carga no renovable, debido al uso de gas natural para cumplir con los requerimientos energéticos del proceso, por lo que su impacto fue mayor. Además, el uso de pellets crudos o torrefactos implicó un valor de PO_{4eq} ligeramente inferior al obtenido para la

combustión del carbón, arrojando reducciones de EP en torno al 15% y 12% respectivamente. La combustión de carbón daría lugar a mayores emisiones de NOx gaseoso, por lo que a pesar de que la biomasa torrefactada tiene un EP más alto que el carbón, su efecto a una tasa de sustitución del 20% fue menor que el producido a partir de las emisiones de NOx.

Según el Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono (CDIAC-<http://cdiac.ornl.gov/>), las emisiones de CO₂ a partir de carbón en Chile promediaron 7.18 millones de toneladas de CO₂/año en 2012. Por lo tanto, una reducción de GEI como resultado del uso de biomasa en la generación de electricidad es muy relevante. En esta categoría (GWP) los resultados del ACV mostraron la mayor disminución (15,8%) cuando se usaron pellets crudos con carbón. En el caso de los pellets torrefactos, las emisiones de CO₂ también se redujeron a 4990 kgCO₂/kg_{rósil} y 1426 kgCO₂/kg_{renovable} en comparación con la combustión de carbón. Estos resultados sugerirían que la biomasa podría sustituir linealmente al carbón de sus aplicaciones reales, lo que conduciría a una reducción directa del GWP de la tecnología.

Como la biomasa contiene cantidades insignificantes de azufre, se espera que durante la combustión se produzcan bajas emisiones de SO₂. Por lo tanto, una mayor sustitución de carbón por biomasa debería reducir linealmente las emisiones de SO₂ y su efecto sobre la acidificación, como se muestra en la Figura 13. Además, las categorías de impacto HTP, TETP y MAETP también mejoraron cuando se utilizó biomasa como sustituto del carbón. Las reducciones en estas categorías variaron de 9 a 17%, lo que fue similar a otros informes de la literatura (Atilgan and Azapagic 2015; Schakel et al. 2014). Se encontró un resultado bastante interesante para FAETP, que fue ligeramente superior (3%) para el cocido de carbón con pellets torrefactos. Este hecho estaría relacionado con el medio de torrefacción utilizado aquí como referencia (vapor) y con el combustible considerado para producir este vapor (gas natural). La mayor parte del impacto del carbón se debió a las emisiones de metales al agua dulce durante la extracción, incluidos níquel, berilio, cobalto, vanadio, cobre y bario. Finalmente, el potencial de oxidación fotoquímica se redujo en un 28 y un 23,4% respectivamente, para el pino crudo y torrefactado.

Conclusiones del ACV.

En este documento, se utilizó el Inventario de Ciclo de Vida y la Evaluación de Impactos para comparar los perfiles ambientales del carbón importado en Chile con el de los pellets de madera cruda y torrefactada, en la generación de electricidad. Los resultados demostraron que combustionar carbón con biomasa es una alternativa muy atractiva para reducir los impactos ambientales asociados a la generación de electricidad en Chile. De hecho, el estudio demuestra que la combustión de carbón con pellets de madera sin tratar o torrefactada puede conducir a reducciones importantes en categorías de impacto como AP (28 - 26%), ADP (15 - 7%), EP (15 - 12%), GWP (16 - 6%), POP (28 - 23%), HTP (17 - 15%), TETP (12 - 9%) y MAETP (17 - 15%). El uso de no energías no renovables para la realización de la torrefacción -utilizando vapor como medio de calentamiento- implica que las categorías FAETP y ODP para los pellets de madera torrefactados fueran similares a las del carbón. Por lo tanto, es muy importante integrar la síntesis de procesos

con las herramientas de evaluación ambiental, para determinar en qué medida se podría mejorar la sostenibilidad de las plantas de carbón existentes.

Estos resultados validan la ACV como una metodología que entrega resultados valiosos a los decisores para la elaboración de estrategias locales en virtud del desarrollo de matrices energéticas con altos estándares de sustentabilidad.

6. Desafíos y alcances. Aportes para el Maletín de Buenas Prácticas

En cuanto al uso de biomasa lignocelulósica, algunos de los desafíos son:

- Las rutas energéticas que parten de la producción forestal; dependen de un ciclo productivo relativamente extenso (10 a 20 años). Dado que las bases de datos y los preceptos del ACV están diseñados para sistemas de producción a corto plazo, hay un desafío en definir un límite de sistema espacio-temporal adecuado que cubra todos los procesos silvícolas y técnicos pertinentes para la producción de los productos forestales (madera en rollo, chips, madera aserrada, entre otros) (Cherubini and Strømman 2011).
- La aplicación de las reglas de asignación de cargas ambientales es importante para los procesos bioenergéticos, los cuales tienen importante influencia sobre los resultados finales. Usualmente los procesos y subprocesos dentro de una ruta de bioenergía se caracterizan por ser procesos multi-productos (e.j. electricidad y calor obtenidos desde CHP, glicerina y torta derivados de la producción de biodiesel). Diferentes criterios han sido usados (masa, energía, economía, producto evitado), sin embargo el tema relacionado a qué procedimiento es el más adecuado sigue sin resolverse.
- La evaluación de los impactos ambientales orientados al uso y cambio de la tierra, uso del agua, así como los cambios en las reservas de carbono, los impactos en los suelos y la biodiversidad aún no se encuentran estandarizados en los estudios de ACV para la bioenergía. Esto se debe a la complejidad de las interrelaciones entre sistemas de producción y el entorno natural y técnico, así como la falta de información, que no permite con facilidad estandarizar dichas categorías de impactos.
- Las emisiones de CO₂ producto de la combustión de biomasa tradicionalmente no son consideradas dentro del balance de carbono, debido a que se asume carbono neutral; es decir, el CO₂ liberado por la combustión de biocombustible es aproximadamente igual a la cantidad de CO₂ secuestrado en la biomasa. Sin embargo, la suposición de la neutralidad de carbono de la bioenergía es cuestionable según el punto de vista del ciclo de vida. Específicamente, cuando el carbono se deriva de la biomasa forestal con ciclos de rotación largos, la generación de adsorción de carbono se encuentra desequilibrada (CHERUBINI et al. 2011).
- Finalmente, se debe mencionar que las tecnologías emergentes de pretratamiento: lavado con ácidos, digestión, procesos solvólicos, torrefacción, etc. Carecen de datos obtenidos a escala industrial, lo cual podría incorporar un margen de error relativamente alto en la predicción de los impactos asociados a estas tecnologías.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigaciones (ANID-Chile) por el financiamiento ofrecido a través de los proyectos: FONDECYT1190063, FONDECYT 11170302 y PIA/AFB 17007.

Referencias

- Arteaga-Pérez, L. E., H. Grandón, M. Flores, C. Segura, and S. S. Kelley (2017). "Steam Torrefaction of Eucalyptus Globulus for Producing Black Pellets: A Pilot-Scale Experience." *Bioresource Technology* 238.
- Arteaga-Pérez, Luis E., Cristina Segura, Daniela Espinoza, Ljubisa R. Radovic, and Romel Jiménez (2015). "Torrefaction of Pinus Radiata and Eucalyptus Globulus: A Combined Experimental and Modeling Approach to Process Synthesis." *Energy for Sustainable Development* 29:13–23.
- Arteaga-Pérez, Luis E., Mabel Vega, Lina C. Rodríguez, Mauricio Flores, Claudio A. Zaror, and Yannay Casas Ledón (2015). "Life-Cycle Assessment of Coal-Biomass Based Electricity in Chile: Focus on Using Raw vs Torrefied Wood." *Energy for Sustainable Development* 29:81–90.
- Atilgan, Burcin and Adisa Azapagic. 2015. "Life Cycle Environmental Impacts of Electricity from Fossil Fuels in Turkey." *Journal of Cleaner Production* 106:555–64.
- Bare, Jane C., Patrick Hofstetter, David W. Pennington, and Helias A. Udo de Haes. (2000). "Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 5(6):319.
- Benetto, Enrico, Emil-Corneliu Popovici, Patrick Rousseaux, and Jacques Blondin. (2004). "Life Cycle Assessment of Fossil CO₂ Emissions Reduction Scenarios in Coal-Biomass Based Electricity Production." *Energy Conversion and Management* 45(18–19):3053–74.
- Benoît, Catherine., Bernard, Mazijn (2013). United Nations Environment Programme., CIRAIG., Processes and Services. Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, and Canadian Electronic Library. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.
- Brander, M., R. Tipper, C. Hutchison, and G. Davis (2008). "Consequential and Attributional Approaches to LCA: A Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels." *Econometrica Press* 44(April):1–14.
- Cambero, Claudia and Taraneh Sowlati (2014). "Assessment and Optimization of Forest Biomass Supply Chains from Economic, Social and Environmental Perspectives – A Review of Literature." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36:62–73.
- Cherubini, Francesco, Glen P. Peters, Terje Berntsen, Anders H., and Strømman H. (2011). "CO₂ Emissions from Biomass Combustion for Bioenergy: Atmospheric Decay and Contribution to Global Warming". *GCB Bioenergy*, 3:413–426.
- Cherubini, Francesco and Anders Hammer Strømman (2011). "Life Cycle Assessment of Bioenergy Systems: State of the Art and Future Challenges." *Bioresource Technology* 102(2):437–51.

-
- Ciroth, Andreas, Stéphanie Muller, Bo Weidema, and Pascal Lesage (2016). "Empirically Based Uncertainty Factors for the Pedigree Matrix in Ecoinvent." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **21**(9):1338–48.
- Curran, Mary Ann, Margaret Mann, and Gregory Norris (2005). "The International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories." *Journal of Cleaner Production* **13**(8):853–62.
- EURCOMMISSION (2010). Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance. 1st ed. edited by E. Commision. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Ewertowska, A., C. Pozo, J. Gavaldà, L. Jiménez, and G. Guillén-Gosálbez (2017). "Combined Use of Life Cycle Assessment, Data Envelopment Analysis and Monte Carlo Simulation for Quantifying Environmental Efficiencies under Uncertainty." *Journal of Cleaner Production* **166**:771–83.
- Ewing, Brad (2010). "Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edit I on Authors:" Global Footprint Network Report.
- Faé Gomes, Gabriel Meneghetti, Antônio César Faria Vilela, Leandro Dalla Zen, and Eduardo Osório (2013). "Aspects for a Cleaner Production Approach for Coal and Biomass Use as a Decentralized Energy Source in Southern Brazil." *Journal of Cleaner Production* **47**:85–95.
- Finnveden, Göran, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington, and Sangwon Suh (2009). "Recent Developments in Life Cycle Assessment." *Journal of Environmental Management* **91**(1):1–21.
- Henriksson, Patrik John Gustav, Jeroen Bartholomeus Guinée, Reinout Heijungs, Arjan de Koning, and Darren Michael Green (2014). "A Protocol for Horizontal Averaging of Unit Process Data—Including Estimates for Uncertainty." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **19**(2):429–36.
- Hoekstra, A., A. Chapagain, and M. Aldaya (2011). "The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard."
- ISO. 2013. ISO 14067 (2013). Greenhouse Gases - Carbon Footprint of Products - Requirements and Guidelines for Quantification and Communication.
- ISO. 2014. ISO 14046 (2014). Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines.
- ISO 14040 (2006). "The International Standards Organization. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework." 1–28.
- ISO, 14044 (2006). "International Standard Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines." 46.
- ISO 14064-1 (2006). "Greenhouse Gases — Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals."
- Nocquet, Timothée, Capucine Dupont, Jean-Michel Commandre, Maguelone Gâteau, Sébastien Thiery, and Sylvain Salvador (2014). "Volatile Species Release during Torrefaction of Biomass and Its Macromolecular Constituents: Part 2 – Modeling Study." *Energy* **72**:188–94.
- Prins, Mark J., Krzysztof J. Ptasinski, and Frans J. J. G. Janssen (2006). "Torrefaction of Wood." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **77**(1):28–34.
-

-
- Reap, John, Felipe Roman, Scott Duncan, and Bert Bras (2008). "A Survey of Unresolved Problems in Life Cycle Assessment." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **13**(4):290.
- Rebitzer, G., T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W. P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema, and D. W. Pennington (2004). "Life Cycle Assessment: Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications." *Environment International* **30**(5):701–20.
- Schakel, Wouter, Hans Meerman, Alireza Talaei, Andrea Ramírez, and André Faaij. (2014). "Comparative Life Cycle Assessment of Biomass Co-Firing Plants with Carbon Capture and Storage." *Applied Energy* **131**:441–67.
- Seidel, Christina (2016). "The Application of Life Cycle Assessment to Public Policy Development." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **21**(3):337–48.
- Singh, Prashant Kumar and Prabir Sarkar (2018). "Eco-Design Approaches for Developing Eco-Friendly Products: A Review". *Advances in Industrial and Production Engineering*. 185-92.
- Sonnemann, Guido, Bruce Vigon, Mireille Rack, and Sonia Valdivia (2013). "Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: Development of Training Material and Other Implementation Activities on the Publication." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **18**(5):1169–72.
- Swarr, Thomas E., David Hunkeler, Walter Klöpffer, Hanna-Leena Pesonen, Andreas Ciroth, Alan C. Brent, and Robert Pagan (2011). "Environmental Life-Cycle Costing: A Code of Practice." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **16**(5):389–91.
- Tsalidis, Georgios-Archimidis, Yash Joshi, Gijsbert Korevaar, and Wiebren de Jong. (2014). "Life Cycle Assessment of Direct Co-Firing of Torrefied and/or Pelletised Woody Biomass with Coal in The Netherlands." *Journal of Cleaner Production* **81**:168–77.
- United Nations Environmental Program (UNEP) (2011). Note 12: Towards a Life Cycle Sustainability Assessment.
- Vega, M, Zaror, C. (2011). "Life Cycle Inventory of Electricity Generation in Chile." in CILCA 2011, edited by N. Suppen. Guadalajara.
- Vega, M, Zaror, C. (2011). Life Cycle Inventory of Electricity Generation and Distribution in Chile.
- Weidema, Bo P., Massimo Pizzol, Jannick Schmidt, and Greg Thoma (2019). "Social Responsibility Is Always Consequential — Rebuttal to Brander, Burritt and Christ (2019): Coupling Attributional and Consequential Life Cycle Assessment: A Matter of Social Responsibility." *Journal of Cleaner Production* **223**:12–13.
- Yang, Lu, Yunchao Wu, Yichu Wang, Weiqi An, Jie Jin, Ke Sun, and Xiangke Wang. (2020). "Effects of Biochar Addition on the Abundance, Speciation, Availability, and Leaching Loss of Soil Phosphorus." *Science of The Total Environment* 143657.
- Zhang, Chi, Xiaoxian Chen, Yu Li, Wei Ding, and Guangtao Fu. (2018). "Water-Energy-Food Nexus: Concepts, Questions and Methodologies." *Journal of Cleaner Production* **195**:625–39.
-

CASO VIII. Implementación de *Saccharum spontaneum* L. como materia prima en el tratamiento de aguas contaminadas

Jorge M. Chen B.¹, Arthur James^{1,*}, Euclides Deago², Zohre Kurt³,
Maria De Los A. Ortega¹

¹. *Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá.*

². *Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá.*

³. *Department of Environmental Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turquía.*

Resumen. Ante la problemática actual por la contaminación de efluentes industriales por metales pesados y nutrientes agrícolas, desarrollamos los proyectos para la "Evaluación del potencial de la Paja Canalera (*Saccharum spontaneum* L.) carbonizada para la captación y retención de metales pesados de aguas contaminadas" y el "Uso de material detrítico de *Saccharum spontaneum* L. para biorremediación del agua subterránea contaminada con nitrato" como alternativas al tratamiento convencional de aguas contaminadas. A la vez, se aprovecha el cultivo de *Saccharum spontaneum* L. cuya proliferación y crecimiento representa un problema para salud de la población y el ecosistemas nativos de Panamá. Como resultados de estas investigaciones se logró carbonizar la *Saccharum spontaneum* L. por medio de un gasificador de lecho fijo y flujo ascendente a un rendimiento aceptable. De igual forma, se encontró que fue posible la remoción completa de nitrato usando el carbono orgánico liberado del material detrítico de la paja canalera con tasas de remoción de nitrato similar y superior que en los sistemas que usan carbono orgánico dosificado. Considerando aspectos de sostenibilidad económica y ambiental se visualiza el potencial de aprovechamiento del cultivo de *Saccharum spontaneum* L. por ser un material de bajo costo y fácil acceso con miras a su transformación para la generación de nuevos productos que brinden soluciones a las problemáticas energéticas y ambientales de Panamá y la región.

*Correspondencia: Arthur James. E-mail: arthur.james@utp.ac.pa

1. Introducción

Actualmente existe una problemática en cuanto a la disponibilidad y calidad del agua. Factores como el aumento en la densidad de la población, el deterioro ambiental producto de la urbanización, las inadecuadas políticas ambientales y la falta de una cultura en el uso racional del agua, comienzan a dar resultados en el manejo del agua que son alarmantes (Escolero et al., 2016; Martínez et al., 2011). Considerando un escenario global, existe preocupación debido al incremento de los índices de contaminación de efluentes industriales que contienen metales pesados como el cobre, plomo y zinc (Tejada-Tovar et al., 2015). Estos metales persisten indefinidamente en el medio ambiente, comprometiendo el equilibrio y el bienestar de la flora y la fauna. En elevadas concentraciones, estos metales pueden ser muy tóxicos y ocasionar problemas de salud a los seres vivos (Roig, 2006). Aunado a esto, la presencia de nitratos en aguas representa otro problema que afecta la salud de las personas, donde el más relevante es la afectación de la población infante a través de la metahemoglobinemia o la limitación de la hemoglobina para captar oxígeno. Este síndrome afecta principalmente a niños menores de 6 meses (Chambon et al., 1998). Los niveles de toxicidad por ingesta de nitrato dependen de su concentración en el agua (Tabla 1). De igual forma, Manassaram et al. (2010) establecen que la ingesta de nitrato es un riesgo para las mujeres embarazadas.

Tabla 1. Se han identificado niveles de toxicidad de nitrato en agua que ingieran infantes menores de 6 meses.

Concentraciones (mg N-NO ₃ /L)	Riesgo a la salud
<26	Efectos despreciables a la salud
26-44	Riesgos insignificantes
44-89	Ligero riesgo crónico en algunos infantes
89-177	Posible riesgo crónico en algunos infantes

Fuente: Adaptado de (Schoeman & Steyn, 2003).

Debido a los riesgos a la salud descritos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) definió valores límites para la concentración de nitrato en el agua potable de 50 mg N-NO₃/L (Chambon et al., 1998). De igual forma, la norma panameña estableció el valor recomendado por la OMS para el nitrato en agua potable (MICI, 1999).

El agua es un recurso valioso en materia de producción de alimentos y de energía sostenible para la supervivencia humana; es un derecho, pero a la vez un vínculo crucial entre la humanidad con el medio ambiente. La accesibilidad al agua potable está definida por las Naciones Unidas a través del sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 6) que establece la prioridad de garantizar agua limpia y accesible, que resultará en suplir una necesidad vital, derivando en comunidades saludables

por la subsecuente higiene. A pesar que el agua aún es un recurso abundante, la misma es finita y vulnerable (Consejo Nacional del Agua, 2016).

Este desafío por mejorar las condiciones y acceso al agua potable de calidad ha encaminado a los científicos en las últimas décadas a unir esfuerzos en la búsqueda de alternativas para esta problemática (Carnovale & Cuadra, 2004; Duarte R. et al., 2009; Sala et al., 2010). En cuanto al tratamiento de efluentes contaminados por metales pesados el método más empleado es la precipitación. Sin embargo, este método presenta una desventaja debido al manejo de desechos sólidos que pueden generar un problema secundario de contaminación (Ajmal et al., 1998; Bolisetty et al., 2019). Se han desarrollado alternativas entre las que se destaca la adsorción, que es un fenómeno en el cual las partículas se fijan en la superficie de un material adsorbente (Mohammed et al., 2011).

La adsorción es reconocida por su fácil implementación, bajo costo y alta eficiencia de remoción (Carnovale & Cuadra, 2004), donde el principal material empleado en este procedimiento y el más estudiado es el carbón vegetal (Ali & Gupta, 2007). En cuanto a la eliminación de nitrato, se han desarrollado varias tecnologías competitivas utilizadas para el tratamiento del agua contaminada con nitrato. En entre estas están la ósmosis inversa e intercambio iónico para remover el nitrato del agua, pero estos no resultan económicos a gran escala (Matějů et al., 1992). Además, está la desnitrificación biológica, la cual se convirtió en una interesante alternativa por ser una tecnología eficiente, económica y compatible con el ambiente, si se compara con tecnologías descritas (Matějů et al., 1992). A la innovación de la desnitrificación se suma el uso de Sustratos Sólidos Orgánicos Naturales (SSON) como paja de trigo, mazorca de maíz, estillas de madera y otros más (Capodici et al., 2014; Filter et al., 2020; Li et al., 2012; Ramírez-Godínez et al., 2015; Wang & Chu, 2016; Xu et al., 2011; Yao et al., 2019; Zhang et al., 2015).

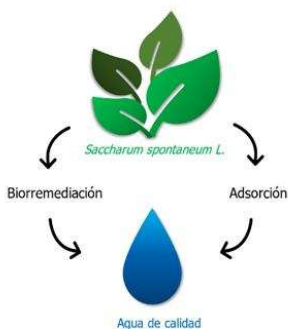


Figura 1. Aprovechamiento de la *Saccharum spontaneum L.*
(Fuente: elaboración propia)

En esta búsqueda de alternativas a las problemáticas presentadas, todo indica que el camino a seguir debe estar enfocado en la utilización de materia prima abundante y cuyos costos para su recolección y preparación sean relativamente bajos comparados a los convencionales. De nuestra propuesta de investigación surgen dos alternativas de aprovechamiento de la Paja Canalera (*Saccharum spontaneum L.*): en la desnitrificación, por medio del uso de SSON como la Paja Canalera (*Saccharum spontaneum L.*) para la liberación de carbono orgánico y para la producción de biocarbón como material adsorbente para la retención de metales pesados en aguas contaminadas (Ver Figura 1).

2. La Paja Canalera, de un problema a múltiples soluciones.

La *Saccharum spontaneum L.* es una especie herbácea perenne alta de hasta cuatro metros de altura, con raíces profundas y rizomas. Esta planta es originaria de Asia y África (Dangol, 2005). Su crecimiento es habitual en zonas cercanas a ríos y lagos, con una altitud que varía desde el nivel del mar hasta los 1800 m.s.n.m. (Schmid et al., 1998). En cuanto a su morfología, esta es una hierba cuyo tallo es robusto y pulido, de composición sólida en la sección superior y fibrosa en la inferior. Las hojas son lineales, involutas y con base redonda (Pandey et al., 2015).

La *Saccharum spontaneum L.*, es una especie no nativa de la flora panameña. En Panamá, la hipótesis mayormente aceptada es que la planta fue introducida por los estadounidenses, durante el siglo pasado, para el control de la erosión del terreno en los alrededores del Canal de Panamá, de ahí el nombre por el que popularmente es conocida en Panamá, Paja Canalera (Cerezo, 2010). Actualmente, la *Saccharum Spontaneum L.* cubre extensas áreas de terreno, en su mayoría en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (Autoridad del Canal de Panamá, 2013).

En Panamá, la *Saccharum spontaneum L.* es considerada una especie invasiva debido a su rápido crecimiento y proliferación. Esta planta representa una amenaza al ecosistema natural porque ha alterado el proceso de regeneración de las especies nativas de Panamá, por lo que impide el desarrollo de la flora nativa, representando un problema para la producción agrícola (Jones et al., 2004). Durante la estación seca, la planta expone a incendios extensas áreas. Los incendios pueden ser espontáneos o provocados por quemas no controladas, lo que genera un problema para la salud pública debido a las emisiones de gases contaminantes y hollín (Karataş & Gülder, 2012).

Los gobiernos locales han realizado inversiones millonarias para mitigar el impacto de esta planta en el ecosistema. Poco se ha logrado debido a que las condiciones climáticas de Panamá favorecen el crecimiento de esta especie (Cerezo, 2010). Considerando este panorama, surge la necesidad de ejecutar y promover proyectos para encontrar soluciones estratégicas que ayuden no solo a prevenir la proliferación de esta planta, sino también aprovecharla y así generar nuevos productos. Entre las posibles aplicaciones para la utilización de la biomasa derivada de la *Saccharum spontaneum L.* está la combustión, gasificación, pirólisis, hidrólisis, entre otros proce-

sos, como el de desnitrificación, que puedan brindar una solución a problemáticas energéticas y ambientales.

2.1. Evaluación del potencial de la Paja Canalera (*Saccharum spontaneum* L.) para la captación y retención de metales pesados de aguas contaminadas.

Este proyecto tiene como finalidad evaluar la capacidad que tiene el biocarbón producido a partir de la *Saccharum spontaneum* L. para la adsorción y retención de metales pesados como el cobre, hierro y zinc presentes en aguas contaminadas. Con esto se busca desarrollar una tecnología alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas, a la vez que se aprovecha el cultivo de la Paja Canalera añadiendo valor a la biomasa cuya utilidad no ha sido explotada en Panamá.

Actualmente el proyecto se encuentra en ejecución y se han completado las etapas de producción y caracterización del biocarbón. El lector puede verificar el status del proyecto visitando el Sistema de Información Científica de la Universidad Tecnológica de Panamá (SIC UTP) por medio del número de proyecto #GPAF4068819 o a través del siguiente enlace <http://www.investigadores.utp.ac.pa/proyectos/774>

a. El biocarbón

El carbón vegetal es también conocido como biocarbón (*biochar* en inglés) el cual es un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno (Rebolledo et al., 2016). En términos de atributos físicos, el biocarbón es negro, altamente poroso, liviano y tiene una gran superficie. Es un material rico en carbono (C) el cual representa aproximadamente el 70 % de su composición, el porcentaje restante consiste en nitrógeno (N), hidrógeno (H), oxígeno (O), entre otros metales como calcio (Ca) y magnesio (Mg) (International Biochar Initiative, 2015). La composición química del biocarbón varía según las materias primas utilizadas para fabricarlo y los métodos utilizados para su producción (Spears, 2018).

A diferencia del carbón vegetal clásico que es utilizado como combustible, el biocarbón es usado en diversas aplicaciones como el mejoramiento de las propiedades del suelo y como material adsorbente de contaminantes para el tratamiento de aguas contaminadas producto de diversas actividades como la agrícola, agroindustrial, entre otras (Becerra, 2015). El biocarbón parecer ser un material simple, pero la realidad es que puede ayudar a resolver una amplia variedad de problemas.

b. Recolección y preparación de la materia prima.

Para este proyecto, el punto de recolección de la *Saccharum spontaneum* L. se estableció en Chilibre Centro (distrito de Panamá) con coordenadas 9°09'34.8" N y 79°37'56.5" O. Los principales criterios para la selección de este punto fueron la

configuración, accesibilidad del terreno y la alta densidad del cultivo. Con esto se garantiza un buen suministro de la materia prima para el desarrollo del proyecto.

La paja recolectada se secó al aire libre bajo techo. Una vez la paja recolectada estuviese seca en su totalidad, se trituró para disminuir el tamaño del tallo y hojas. Los fragmentos de la *Saccharum spontaneum L.* triturada se tamizaron empleando un conjunto de tres tamices. Se separaron los fragmentos menores a 2 mm (polvo), de los mayores a 4 mm los cuales mantienen una estructura fibrosa. Con el tamizado se obtuvo un material con un tamaño de partícula intermedio y homogéneo entre los 2 mm y 4 mm.

c. El Proceso de carbonización.

Para lograr la carbonización de la *Saccharum spontaneum L.*, se utilizó un gasificador de lecho fijo y flujo ascendente (*Top-Lit Updraft*). En la Figura 2 se puede observar el diagrama de este gasificador. Este gasificador consiste en un tubo de acero inoxidable de 100 cm de altura y 15 cm de diámetro. El aire es suministrado al gasificador por medio de un compresor de aire de 1,12 kW con 1034 kPa de presión y 22,7 litros de reserva (BRIGGSS & STRATTON) a una presión de 1186 kPa. El flujo de aire se controla en la entrada del gasificador mediante un flujómetro montado en aluminio (RITEFLOW DE BEL-ART) con escala a 150 mm, tamaño 4 a una presión de 9507 kPa. La temperatura en los tres puntos a lo largo del gasificador (superior, intermedio e inferior) se registra por medio de un dispositivo de recolección de datos (HOBO modelo UX120) empleando tres termopares tipo K con un diámetro de 3,2 mm, tal como se observa en la Figura 2.

1. Gasificador *Top-Lit Updraft* (TLUD).
 2. Compresor de aire.
 3. Flujómetro.
 4. Data logger.
 5. Dirección de la combustión.
 6. Dirección del flujo de aire.
 7. Capa de combustión.
 8. Biomasa.
 9. Biocarbón.
 10. Gases de combustión.
- TC-1. Termopar superior.
TC-2. Termopar intermedio.
TC-3. Termopar inferior.

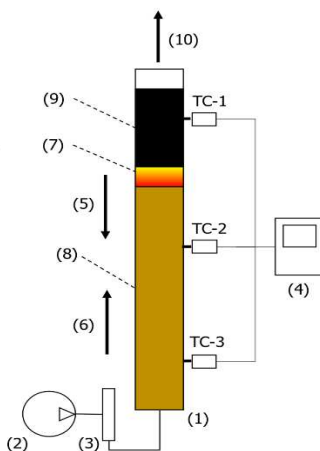


Figura 2. Gasificador de lecho fijo y flujo ascendente (*Top-Lit Updraft*).
(Fuente: elaboración propia)

La combustión de la biomasa se desarrolla de forma descendente contraria a la dirección del aire suministrado. La capa de combustión quema la biomasa ubicada justo debajo de ella, en la zona superior de la capa de combustión se deposita el biocarbón producido. Los gases de combustión escapan por la sección superior del gasificador.

Tomando en cuenta la capacidad del flujómetro, se establece un flujo intermedio de aire a la entrada de 16 L/min para carbonizar la Paja Canalera. Se realizaron tres réplicas para este ensayo.

d. Parámetros de operación del gasificador

Para nuestro proceso se registró una temperatura máxima de carbonización de $597,65 \pm 9,05$ °C. James R et al., (2018) reportó una temperatura máxima de carbonización de 825 °C para cascarillas de arroz y de 800 °C para astillas de madera, empleando el mismo método de carbonización. La elevada temperatura de carbonización genera un incremento en el área superficial del material (Peterson & Jackson, 2014), esta es una característica que garantiza la capacidad de adsorción del biocarbón (P. Rodríguez et al., 2010).

El rendimiento mide la relación porcentual entre la masa de biocarbón obtenida respecto a la biomasa inicial sin carbonizar (Brown et al., 2015), para este ensayo se obtuvo un rendimiento de $26,71 \pm 0,62$ % a una razón de quemado de $4,28 \pm 0,27$ g/s. El valor obtenido para el rendimiento se mantiene entre los límites registrados por otros métodos de carbonización. Por ejemplo, para un horno de tipo pozo la productividad se encuentra entre 12,5 y 30 %, para un horno de ladrillo entre 12,5 y 33 %, y para un horno portátil de acero entre 18,9 y 31,4 % (Kammen & Lew, 2005).

e. Caracterización del biocarbón

Se realizó un análisis próximo a la biomasa y al biocarbón para determinar la variación de sus propiedades debido al proceso de carbonización. En la tabla 2 se observa una disminución en el contenido de humedad del biocarbón con respecto a la materia prima. Esto se debe a que parte del agua contenida en la biomasa se evapora durante la combustión incompleta (Moya Roque, 2018). En cambio, se aprecia que el contenido de cenizas aumenta luego del proceso de carbonización. La mayoría de los componentes de las cenizas son minerales que no reaccionan durante el proceso de carbonización, lo cual explica el aumento porcentual de este componente (Lehmann & Joseph, 2012). El incremento en el contenido de carbón fijo se puede atribuir a la alta temperatura de carbonización alcanzada durante el proceso, además al bajo contenido de ceniza de la materia prima sin carbonizar (James Rivas, 2015). La capa de combustión en los gasificadores de flujo ascendente es alimentada por la liberación de los materiales volátiles de la biomasa en la zona inferior (Saravanakumar et al., 2007), lo que explica la disminución en el contenido de estos componentes con respecto a la biomasa.

Tabla 2. Análisis próximo de las muestras de biomasa y biocarbón.

Propiedades	Biomasa	Biocarbón
Humedad (%)	9,47 ± 1,54	3,49 ± 0,85
Ceniza (%)	5,32 ± 3,17	21,55 ± 2,01
Carbón fijo (%)	4,72 ± 1,62	32,78 ± 4,74
Material volátil (%)	80,49 ± 1,49	42,18 ± 5,46

El proceso de gasificación genera un biocarbón con un pH alcalino de $10,32 \pm 0,07$ a partir de una biomasa con un pH de $7,74 \pm 1,54$. James et al. (2020), generaron un biocarbón básico ($\text{pH} > 7$) a partir de astillas de madera de pino empleando el mismo método de carbonización. La importancia de conocer el pH del biocarbón radica en que la capacidad de adsorción no depende únicamente de las propiedades físicas superficiales, como el área superficial, sino también de los grupos químicos presentes en la superficie (F. Rodríguez, 2007; P. Rodríguez et al., 2010). En términos generales, podemos decir que si el pH de la solución es mayor que el pH del biocarbón, predominan las cargas negativas en la superficie del biocarbón, en cambio, si el pH de la solución es menor que el pH del biocarbón, predominan las cargas positivas en su superficie (Kosmulski, 2004). Un biocarbón con carga negativa en su superficie presenta mayor afinidad para retener cationes, en cambio, si el biocarbón presenta carga positiva en su superficie tendrá mejor capacidad para retener aniones (Radovic et al., 2000).

2.2. Estudio de caso. Bioremediación de agua subterránea contaminada con nitrato usando *Saccharum spontaneum L.*, como fuente de carbono.

Esta investigación se desarrolló a través del proyecto "Uso de material detrítico de *Saccharum spontaneum L.* para biorremediación del agua subterránea contaminada con nitrato". El lector puede verificar el status del proyecto visitando el Sistema de Información Científica de la Universidad Tecnológica de Panamá (SIC UTP) por medio del número de proyecto #GPAC1044118 o a través del siguiente enlace <http://www.investigadores.utp.ac.pa/proyectos/505>.

a. Colecta de la *Saccharum spontaneum L.*

La *Saccharum spontaneum L.* se colectó en los predios de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Panamá. La parte estudiada de la *Saccharum spontaneum L.* fue el material detrítico (tallo), dado que es la parte de la planta que concentra el mayor contenido lignoceluloso (Reddy & DeLaune, 2008). El tallo de este tipo de planta consta de dos partes principales que son corteza y médula (Audesirk et al., 1996) (Figura 3).

Se determinaron propiedades físicas como porcentaje de masa seca y contenido de humedad; además, se determinó porcentaje de fibras (lignina, celulosa y hemicelulosa); así como propiedades químicas (nitrógeno, fracción biodegradable y carbono orgánico disponible). El contenido de humedad se obtuvo secando las muestras en un horno a 105 °C por 24 horas. El contenido de fibras se determinó usando el método de Van Soest (P. J. V. Soest, 1963). El nitrógeno total fue determinado por el método Kjeldahl (American Public Health Association et al., 2005). El carbono total fue encontrado por medio del método de combustión (American Public Health Association et al., 2005). En tanto, el contenido de bromatológico en la *Saccharum spontaneum* L. se determinó aplicando digestión por ácido nítrico y luego al extracto obtenido se le aplicó el método de detección ICP (American Public Health Association et al., 2005). La fracción biodegradable y el carbono orgánico disponible, se determinó aplicando la metodología propuesta por Van Soest (P. J. Van Soest, 1996).

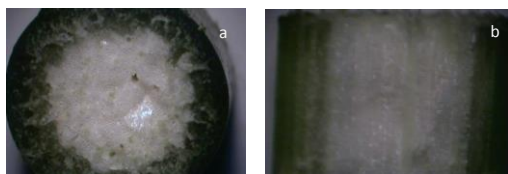


Figura 3. Vistas del tallo de *Saccharum Spontaneum* L. a) Sección transversal; y b) Sección longitudinal. (Fuente: (Deago, 2014)

El contenido de carbono orgánico presente en la *Saccharum spontaneum* L., se expresó como Demanda Química de Oxígeno (DQO), definiendo asumiendo el CH₂O como el carbono orgánico era presente y con el cual se obtuvieron los electrones equivalentes. Finalmente, se determinó el índice de lignoceluloso que es una metodología propuesta por Melillo et al. (1989), la cual permite definir la calidad de los sustratos en función del contenido de celulosa y hemicelulosa.

b. Ensayos de desnitrificación

Para el estudio de la *Saccharum spontaneum* L, se estableció en primera instancia una metodología experimental en reactores batch. A través de esta metodología fue posible determinar una serie de parámetros importantes para entender el proceso de desnitrificación como la cinética y tasa de remoción de nitrato. De igual forma, fue posible establecer la tasa de liberación de carbono orgánicos hidrolizado que era usado por las bacterias heterótrofas, responsables de la desnitrificación.

Inicialmente, se investigó en reactores batch la desnitrificación del agua usando *Saccharum spontaneum* L. como fuente de carbono. En esta investigación se realizaron reactores en triplicado en el Sistema Oxitop ®, el cual es tiene la capacidad de medir los incrementos de presión que generan los procesos internos de los microorganismos (WTW, 1998). A través de este sistema fue posible detectar la presión

interna generada por el gas N_2 producido por la total desnitrificación. El CO_2 generado fue removido por medio de una trampa de hidróxido (Figura 4)(WTW, 1998).

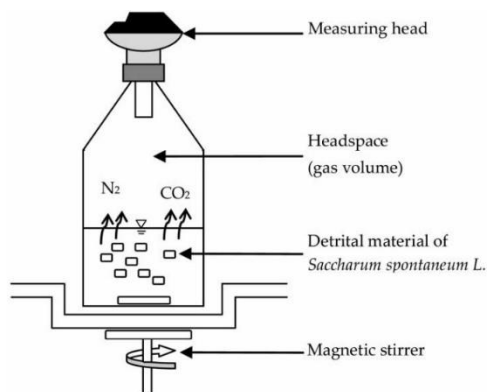


Figura 4. Esquema de funcionamiento del sistema Oxitop® durante desnitrificación usando *Saccharum Spontaneum L.* Fuente: (Deago & Pizarro, 2013).

El material usado de la *Saccharum Spontaneum L.* fue el material detrítico (tallo), el cual se cortó en trozos de 1 cm de largo. Este material tenía un diámetro promedio de 1 cm. Para el ensayo batch los reactores fueron preparados de la siguiente forma: se prepararon tres grupos de reactores con materiales. Al primero se le agregó *Saccharum spontaneum L.* completa; al segundo grupo de reactores se le añadió médula de *Saccharum spontaneum L.*; el tercer grupo de reactores se le agregó la corteza de *Saccharum spontaneum L.* A cada reactor se le agregó la misma cantidad material (4 g como masa seca) y de agua (200 mL).

El material de *Saccharum spontaneum L.* no fue lavado, para usar bacterias nativas adheridas a la superficie de los materiales. Se dosificó $NaNO_3$ para obtener una concentración de nitrato de 100 mg $N-NO_3/L$. Todos los reactores fueron desaireados con gas nitrógeno para eliminar el oxígeno disuelto y mantener la misma presión interna. El sobrenadante de los reactores fue analizado para determinar $N-NO_3^-$, $N-NO_2^-$, $N-NH_4^+$ y DQO. Los ensayos con el sistema Oxitop® fueron conducidos por 7 días.

Para evaluar el aporte en la Desnitrificación por parte de bacterias en suspensión en el sobrenadante, se prepararon triplicados de reactores con materiales (*Saccharum spontaneum L.* completa, médula y corteza), los cuales fueron operados por 4 días. Luego los materiales de los reactores se extrajeron para solo dejar el sobrenadante con el carbono orgánico lixiviado de los materiales. Se determinó la concentración de bacterias en suspensión. Esto se hizo para garantizar condiciones similares con los reactores que mantenían los materiales. Estos ensayos realizados en reactores

Oxítóp se les eliminó oxígeno disuelto con nitrógeno gaseoso inyectado por 5 minutos. Los resultados de estos reactores serían comparados con aquellos reactores que contenían los materiales.



Figura 5. Preparación de reactores batch: a) masa de *Saccharum spontaneum L.* completa; b) Médula de *Saccharum spontaneum L.*; c) Tallo de *Saccharum spontaneum L.*; d) Reactores batch en sistema Oxítóp. (Fuente: Deago, 2014, Panamá).

2.3. Evaluación de las propiedades de la *Saccharum spontaneum L.* usadas en el estudio.

El material detrítico de *Saccharum spontaneum L.* fue segmentada, es decir que se separó la corteza de la médula. A ambos materiales se les realizaron análisis bromatológico y fibras. Para el caso de la médula, se registró el mayor contenido de nutrientes, principalmente Ca y K los cuales son 10 veces mayor que los registrados en la corteza (Tabla 3). De igual forma, la médula presentó el mayor contenido de C y N; además, registró menor relación C/N. Estas condiciones favorecen la biodegradación bacteriana (Reddy & DeLaune, 2008; Saliling et al., 2007).

Además, Reddy y DeLaune (2008), afirman que la composición lignocelulosa también influye en la biodegradabilidad. En este sentido, se midió el contenido de fibras a la corteza y a la médula de la *Saccharum spontaneum L.*, encontrándose que su corteza presentó mayor contenido de lignina y celulosa. En tanto, la médula contó con el mayor porcentaje de hemicelulosa (Tabla 3). Entonces, para evaluar la de-

gradabilidad en función del contenido de fibras, se aplicó la metodología definida por Melillo et al. (1989) para determinar el índice lignoceluloso. Para la médula y la corteza el índice lignoceluloso fue de 0,020 y 0,15, respectivamente. Estos resultados indican que la médula tendrá una mayor degradación, dado que al tener un menor porcentaje de lignina las bacterias podrán degradarlo con mayor facilidad (Chandler et al., 1980). Este resultado es consecuente con el contenido de nitrógeno y la relación C/N (Tabla 3).

Tabla 3. Propiedades físico-químicas de la *Saccharum spontaneum L.*

Parámetros	Corteza	Médula
Cenizas (%)	4,68	12,76
Materia seca (%)	78,62	58,33
Densidad (g/mL)	0,76	0,81
Al (mg/g)	0,01	0,03
B (mg/g)	0,00	0,02
Ca (mg/g)	0,21	1,33
Cu (mg/g)	0,01	0,00
Fe (mg/g)	0,12	0,07
K (mg/g)	10,17	48,86
Mg (mg/g)	0,28	0,35
Mn (mg/g)	0,00	0,00
Na (mg/g)	0,05	0,07
P (mg/g)	2,33	3,89
Zn (mg/g)	0,02	0,02
N (%)	0,55	2,10
C (%)	36,62	45,54
C/N	66,58	21,69
Carbono orgánico (%)	26,96	44,05
Celulosa (%)	46,98	30,02
Hemicelulosa (%)	22,19	25,51
Lignina (%)	8,72	0,62
Índice lignoceluloso (LCI)	0,15	0,02
Fracción Biodegradable, <i>fb</i> (%)	66,08	94,17

(Fuente: Deago y Pizarro, 2013)

a. Reactores batch de desnitrificación y comportamiento de DQO, NO₂⁻ y NH₄⁺

El ensayo de desnitrificación en reactores batch se realizó para evaluar el aporte de bacterias en suspensión en el sobrenadante y de aquellas que crecieron adheridas

en los materiales de *Saccharum spontaneum* L. Dichos ensayos de desnitrificación fueron monitoreado por 7 días. Los valores considerados se tomaron a partir del tercer día, debido a que en ensayos preliminares se encontró que en este período ocurrió una completa desnitrificación, lo cual reflejó que existieron las condiciones favorables para las bacterias en cuanto a pH, sustrato y nutrientes.

En los reactores batch de desnitrificación usando sustratos sólidos (*Saccharum spontaneum* L. completa, médula de *S. spontaneum* y corteza de *S. spontaneum*) como fuente de carbono, se monitoreó el comportamiento de la DQO, N-NO_2^- y N-NH_4^+ (Figura 6). Los resultados de la DQO (Figura 5a) mostraron comportamientos similares para los reactores que contenían *Saccharum spontaneum* L. completa y médula, donde tuvieron concentraciones iniciales y finales de 500 mg/L y 220 mg/L, respectivamente. En tanto, la DQO en el reactor con corteza duplicó los valores obtenidos en los otros reactores. La alta liberación de DQO en todos los reactores se debe a la lixiviación de sustratos solubles presentes en las vacuolas del material dérmico usado.

La diferencia entre los valores de DQO de los reactores con *Saccharum spontaneum* L. completa y con médula y los valores del reactor con corteza de *Saccharum spontaneum* L., se asocia a la diferencia de área superficial. La mayor degradabilidad de los materiales, en función del área disponible, ha sido reportado (Sanders et al., 2000).

Los resultados de amonio (Figura 6b) reflejaron bajas concentraciones en los reactores con *Saccharum spontaneum* L. completa y médula ($<0,7 \text{ N-NH}_4^+$ mg/L). La presencia de amonio en los reactores con *Saccharum spontaneum* L. completa y con médula, aunque baja, se atribuye a la amonificación del nitrógeno presente en el material. Esta afirmación es basada en que la médula presentó el mayor porcentaje de nitrógeno; y según la literatura, un material rico en nitrógeno favorece la amonificación (Reddy & DeLaune, 2008).

Con respecto a los reactores con corteza, el amonio fue elevado, alcanzando hasta 8 mg N-NH_4^+ /L (Figura 6b). La alta concentración de amonio en el reactor con corteza de *Saccharum spontaneum* L se relaciona a la Reducción Desasimilatoria de Nitrato a Amonio (RDNA); la cual ha sido reportada como sumidero de nitrato, la cual compete con la desnitrificación biológica, siempre que las condiciones estén dadas (Gibert et al., 2008; Greenan et al., 2006; Hashemi et al., 2011) En este sentido, el reactor con corteza de *Saccharum spontaneum* L. se registró un alto poder reductor (Figura 6a), el cual es un factor que favorece la RDNA (Cuervo-López et al., 2009).

Si bien es cierto, que el amonio es una mejor fuente de nitrógeno para la síntesis celular, su exceso en el agua resulta limitante en la potabilización de agua. Esto es debido a que no se cumple con el concepto básico de minimización de la inestabilidad biológica (Rittmann & McCarty, 2001).

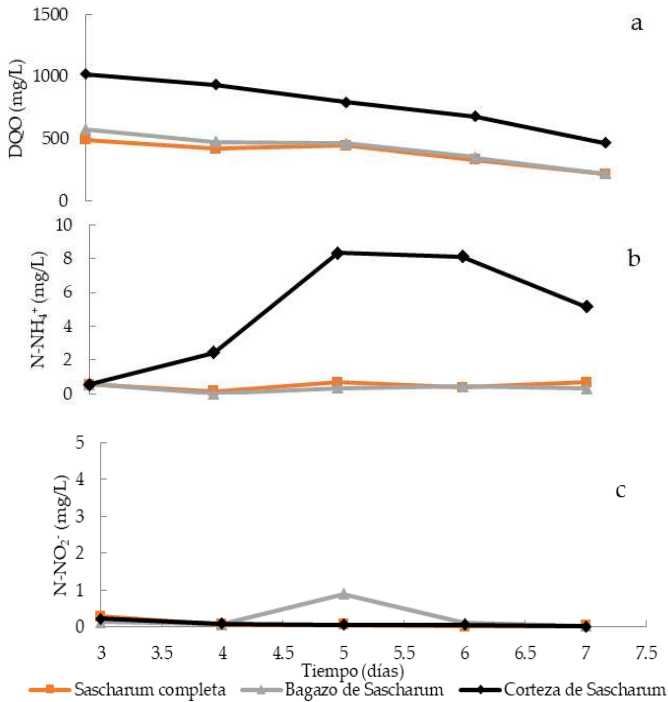


Figura 6. Comportamiento de (a) DQO, (b) amonio y (c) nitrito en reactores batch de desnitrificación.

En cuanto a la medición de nitrito, los resultados estuvieron por debajo de 1 mg/L en los tres reactores (Figura 6c). Reflejando que existió una completa desnitrificación, debido a las condiciones favorables de operación de los reactores (pH, temperatura, nutrientes; también se logró controlar factores inhibidores de la deshidratación que afectan la desnitrificación como son ausencia de oxígeno disuelto y la limitación de donante de electrones (Rittmann & McCarty, 2001).

b. Evolución de la cinética de desnitrificación

El comportamiento en la evolución en el ensayo de desnitrificación, realizada con el sistema Oxitop, fue analizada para los registros del último día de operación del reactor batch, dado que para este período se llegó a un estado estacionario. El estado estacionario registrado con el sistema Oxitop indica que no hubo más generación de gases en el tiempo subsiguiente asociado a la desnitrificación, dado al

agotamiento de nitrato o del carbono. Los valores obtenidos del sistema OxiTop, corresponden a la presión (hPa) que ejerce el nitrógeno formado de la desnitrificación biológica.

Las máximas presiones obtenidas por el sistema Oxitop en el ensayo de desnitrificación para los reactores con *Saccharum spontaneum L.* completa y médula estuvieron entre 108 y 112 hPa, respectivamente; mientras que, para los reactores sin materiales sólidos, las presiones se mantuvieron entre 58 y 64 hPa (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de mediciones de presión para cada tipo de reactor batch de desnitrificación usando el sistema Oxitop.

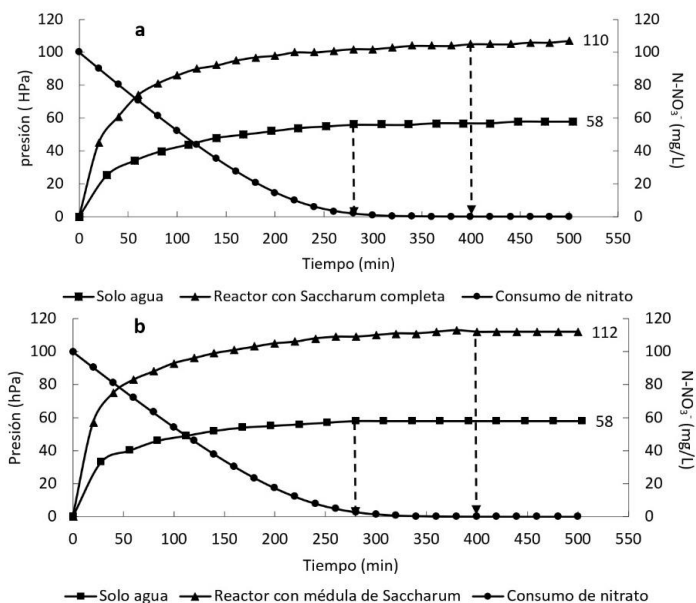
Reactores	Presión (hPa)	Biomasa en el sobrenadante (mg SSV/L)
<i>Saccharum spontaneum L.</i> completa	110	130,28
Médula de <i>Saccharum spontaneum L.</i>	112	147,89
Corteza de <i>Saccharum spontaneum L.</i>	108	154,93
Sobrenadante de <i>Saccharum spontaneum L.</i> completa	58	130,28
Sobrenadante de médula de <i>Saccharum spontaneum L.</i>	58	147,89
Sobrenadante de corteza de <i>Saccharum spontaneum L.</i>	64	154,93

Con las presiones obtenidas con el sistema Oxitop en reactores batch (Tabla 4), se determinaron los moles de nitrógeno gaseoso usando la ley general de los gases y a su vez se obtuvieron la masa de nitrato removido. De este cálculo se desprende que el nitrato dosificado (30 mg) fue removido casi completamente en los reactores con materiales de *Saccharum spontaneum L.* Sin embargo, en reactores solo con sobrenadante, la remoción de nitrato, por acción de las bacterias en suspensión, fue aproximadamente 60% del nitrato dosificado. Este porcentaje es importante en un sistema batch; sin embargo, en sistemas continuos habrá una reducción, debido a que las bacterias en suspensión serían removidas rápidamente. Esto es función del tiempo de retención hidráulico.

Los resultados de desnitrificación en los reactores sin materiales mostraron que hubo limitación de carbono orgánico soluble, lo cual impidió que las bacterias continuaran con la reducción del nitrato dosificado (100 N-NO₃ mg/L). Esta limitación de carbono orgánico no ocurrió en los reactores con materiales, dado que hubo el aporte necesario desde la *Saccharum spontaneum L.* También fue posible comprobar que hubo completa desnitrificación a través de las mediciones de nitrato en el sobrenadante de los reactores una vez concluidos los ensayos. De igual manera, se midieron las concentraciones de nitrito, las cuales estuvieron por debajo de 1 mg/L.

En cuanto a la cinética de la desnitrificación, las mediciones de presión en los reactores con *Saccharum spontaneum L.* completa y con médula lograron su estado estacionario a los 400 minutos de operación (Figura 6a, 6b); mientras que el reactor con corteza llegó a su estado estacionario a los 280 minutos (Figura 7c). El estado estacionario de la presión registrada en el reactor con corteza de *Saccharum spontaneum L.*, puede asociarse a las altas concentraciones de DQO y amonio (Figuras 6a y 6b), los cuales influyen en el crecimiento de bacterias.

Para los reactores sin materiales, la estabilización de la presión se presentó entre los 220 y 280 min. Debido a que lograron su estabilización mucho antes que en los reactores con materiales (Figuras 7a, 7b, 7c). Esto se debe al agotamiento del carbono soluble biodisponible. Al comparar resultados, se encontró que para los reactores con *Saccharum spontaneum L.* completa y con médula tuvieron similitud en el tiempo de agotamiento del nitrato y en la estabilización de presión para cada reactor (Figura 7a y 7b). En ambos casos el equilibrio se logró a los 400 min de operación. Sin embargo, la estabilización de la presión en el reactor con corteza de *Saccharum spontaneum L.* se obtuvo a los 280 min; mientras que la curva de consumo de nitrato mostró su agotamiento a los 340 min (Figura 7c). Estos resultados sugieren que el reactor con corteza estuvo influenciado por una mayor concentración de DQO y de amonio. Estos resultados muestran que es posible evaluar la cinética de desnitrificación usando el sistema Oxitop.



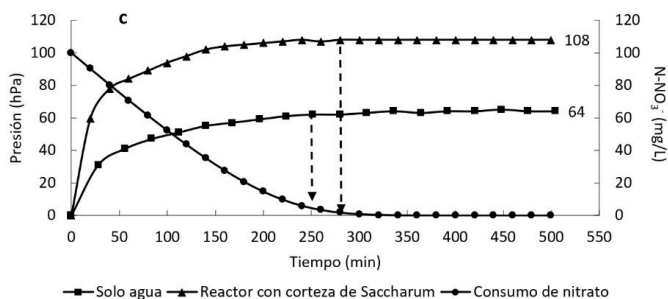


Figura 7. Comportamiento del nitrato y de nitrógeno gaseoso durante la desnitrificación en reactores batch con: (a) *Saccharum spontaneum L.* completa; (b) médula de *Saccharum spontaneum L.*; (c) corteza de *Saccharum spontaneum L.*

Otro hallazgo de la investigación fue que la desnitrificación no se afectó por el alto contenido de sales presentes en la *Saccharum spontaneum L.* (Tabla 3). Este aspecto en proceso de desnitrificación biológica ha sido reportado en otras investigaciones (Foglar et al., 2007; Peyton et al., 2001). Por lo tanto, un sistema a base de *Saccharum spontaneum L.* como fuente de carbono sería viable de implementar en sistemas con alto contenido de sales; por ejemplo, el efluente del sistema de osmosis inversa, dado que la salinidad es elevada (Kapoor & Viraraghavan, 1997).

De los ensayos batch de desnitrificación también se obtuvo la tasa de remoción de nitrato, la cual fue de 90 mg N-NO₃/L·d·g_{sub}. Este valor resultó mayor que aquellos materiales similares, reportados en la literatura (Tabla 5). Este resultado refleja lo eficiente que sería remover biológicamente el nitrato en zonas tropicales, usando la *Saccharum spontaneum L.* como fuente de carbono.

Tabla 5. Tasas de desnitrificación reportadas en la literatura usando sustratos sólidos orgánicos naturales como fuente de carbono orgánico. Fuente. Adaptado de (Deago & Pizarro, 2013).

Sustratos	Concentración de nitrato (mg N-NO ₃ /L)	Tasa de desnitrificación (mgN-NO ₃ /L·d·g _{sub})	Temperatura (°C)	Referencias
Tallo de maíz	100	12,75	20	(Greenan et al., 2006)
<i>Glycyrrhiza glabra</i>	100	6,20	20	(Ovez, 2006)
<i>Arundo donax</i>	100	3,33	20	(Ovez, 2006)
<i>Saccharum spontaneum L.</i>	100	90,00	30	Este estudio

3. Desafíos y el futuro de la *Saccharum Spontaneum L.* en Panamá y la región.

Los usos de la biomasa en Panamá se encuentran fuertemente relacionados con la actividad humana que pueda originarla. El bagazo de caña, por ejemplo, se ha utilizado tradicionalmente en los ingenios de azúcar para producir electricidad. Se estima que tiene un potencial anual para la generación de electricidad de 28 GWh (SNE, 2015). Las cosechas de arroz y el proceso de secado del café generan residuos que son utilizados como combustible para la producción de calor. Tradicionalmente, la madera se ha empleado en áreas rurales y pequeñas zonas industriales para cocinar, tal es el caso de las panaderías y pequeñas empresas dedicadas al secado de granos (IRENA, 2018). Existe un vacío en cuanto a la transformación de la biomasa, derivada de cultivos invasivos como la Paja Canalera, para obtener nuevos productos y así darle un valor agregado para lograr una valorización tanto en energía, como en masa aprovechable a un cultivo que actualmente representa un problema. La biomasa obtenida también puede ser utilizada como materia prima para obtención de un producto físico. Con ello, se lograría abordar la gran problemática de escasez de materia prima en diversos sectores y de los impactos ambientales que pueden generar las actividades de explotación para la obtención de estas.

Existen antecedentes sobre el aprovechamiento de la biomasa derivada de este tipo de cultivos para la producción de biocarbón. En cuanto a la naturaleza del cultivo, se ha carbonizado el Pasto Varilla (*Panicum virgatum*) (Sadaka et al., 2014), el cual es un cultivo con características similares a la Paja Canalera, en cuanto al rápido crecimiento y los bajos requerimientos nutricionales para su desarrollo (McLaughlin & Walsh, 1998). Otro cultivo empleado para estos fines es el Geodae-Uksae 1 (*Miscanthus Sacchariflorus*) (Lee et al., 2013), o incluso cultivos energéticos como la canola (*Brassica napus L.*) (Angin & Şensöz, 2014) también son aprovechados para la producción de biocarbón.

El biocarbón obtenido puede ser utilizado para diferentes finalidades. Existen estudios que evalúan el potencial de estos biocarbones para retener metales pesados en medios acuosos. Para un biocarbón generado a partir del Pasto Varilla (*Panicum virgatum*) a una temperatura de carbonización entre 500 °C y 700 °C se obtuvo una alta afinidad para la adsorción de Cu²⁺ (Han et al., 2013). Mohan et al. (2015) generaron biocarbón a partir de la caña de azúcar por medio de un proceso de pirólisis rápida a 425 °C alcanzando una alta afinidad para la adsorción de plomo.

Más allá, también se puede considerar a los cultivos invasores como precursor para la generación de materiales estructurales y funcionales. Para mitigar los efectos de cambio climático, no solo requerimos utilizar fuentes que se independicen cada vez más de matrices energéticas de base fósil. También requerimos una sostenibilidad en la extracción y utilización de la materia prima disponible. Ciertas iniciativas buscan establecer principios de economía circular en donde se permita valorizar al final de la vida útil de un producto la materia y los procesos energéticos de su primera vida. La utilización de estos cultivos invasores puede lograr un impacto en sostenibi-

alidad similar, al poder aprovechar un producto que generalmente está asociada a una problemática en el ecosistema, como materia prima para procesos y nuevos productos.

En este sentido, Baruah et al. (2020), presentan un estudio en donde se logra aislar de la *Saccharum spontaneum L.*, celulosa microcristalina. En el proceso presentado por los autores, estos lograron establecer un proceso de síntesis que generó un producto con estabilidad térmica y alto grado de cristalinidad, lo cual puede encontrar un lugar en aplicaciones como la industria de cosméticos, recubrimientos, biocompuestos entre otros. En este mismo sentido, Samantray et al. (2020) lograron utilizar este cultivo invasor para la producción de carbón activado. La porosidad lograda del material producido genera altas expectativas de la posibilidad de que el mismo pueda ser utilizado como materia prima para la fabricación de superconductores.

En otros estudios encontrados, se ha observado que también se busca el aprovechamiento de los cultivos invasores como biomaterial, muy particularmente como biopolímeros y biocompuestos. Una problemática que se ha tratado de abordar tanto en la industria del transporte como de la construcción es la posibilidad de integrar el diseño ligero en sus estructuras. La reducción de la cantidad de masa empleada en estas estructuras podría significar una reducción en los consumos energéticos asociados al funcionamiento de estas y por ende de las emisiones que podrían estar asociadas, no solo durante su vida útil, sino también en el resto de las etapas de su ciclo de vida.

Además, de buscar integrar geometrías que logren la reducción de la cantidad de masa, otras estrategias que se han buscado es la de integrar materiales que puedan tener propiedades mecánicas específicas más elevadas, tales como la resistencia mecánica específica y la rigidez específica. En este sentido, los materiales compuestos han representado en las últimas décadas un gran atractivo ya que exhiben excelentes propiedades mecánicas a un peso reducido. Una de las principales desventajas de los materiales compuestos es que sus constituyentes muchas veces están asociados a fuentes fósiles y a matrices de origen termoestable, lo cual los hacen difíciles de reciclar o de valorizar en su fin de vida. Varios estudios encontrados, han tratado de incrementar el potencial que tienen los cultivos invasores tales como la *Saccharum spontaneum L.* como materia prima para biopolímeros y biocompuestos. Dentro de estos estudios podemos mencionar los desarrollados por Kaith et al. (2010) y Maiti et al. (2010). La dirección de búsqueda en este aspecto está dirigida a lograr un mayor desempeño mecánico de estas biofuentes para lograr materiales que puedan cumplir con funciones de alta (Devnani & Sinha, 2019). Sin duda alguna el proyecto de carbonización y desnitrificación empleando *Saccharum Spontaneum L.* establece un antecedente importante en Panamá y la región. Esto es debido a que se abre la ventana a nuevas posibilidades para el aprovechamiento de la biomasa derivada de la *Saccharum Spontaneum L.* para diversas aplicaciones en respuesta a problemas locales.

4. Sostenibilidad

El biocarbón producido a partir de residuos agrícolas, desechos sólidos urbanos y cultivos invasores es eficaz para la adsorción de contaminantes en aguas residuales. Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones sobre este tema se ha realizado en laboratorios bajo condiciones óptimas y su producción para el tratamiento de aguas residuales aún no se ha realizado a nivel industrial. Para que el biocarbón se convierta en el producto preferido para las aplicaciones de tratamiento de aguas residuales se debe determinar si su producción es sostenible, en otras palabras, nos debemos preguntar ¿es ambiental y económicamente viable?

a. Viabilidad ambiental

La viabilidad ambiental está relacionada con el hecho de que el biocarbón se puede producir a partir de residuos agrícolas orgánicos y municipales que de otro modo se quemarían liberando CO₂ a la atmósfera o terminarían depositados en vertederos donde producirían grandes cantidades de gas metano. En otras palabras, es un medio para convertir los desechos en un producto que puede usarse en diversas aplicaciones, incluido el tratamiento de aguas residuales, la producción agrícola y el almacenamiento de carbono.

Los desechos orgánicos varían ampliamente según la latitud, la región, el clima, el suelo y los tipos de cultivos. La biomasa utilizada para producir biocarbón determina el tipo de contaminante que es capaz de eliminar. Actualmente, la mayor parte de la producción de biocarbón se realiza mediante pirólisis a altas temperaturas (300-700 °C) en un ambiente limitado en oxígeno para diferentes tiempos de residencia. Este proceso garantiza que se liberen pocos gases contaminantes a la atmósfera y que una mayor parte de la biomasa se almacene como carbono. Por estas razones, se cree que el biocarbón es más limpio, más ecológico y más sostenible que el carbón vegetal tradicional.

Además, durante la pirólisis se libera gas sintético (*Syngas*, por sus cifras en inglés), bioaceite (*bio-oil*) que se puede procesar para producir resinas, fertilizantes, combustibles y electricidad (Baum & Weitner, 2006; Czernik & Bridgwater, 2004). La ceniza también puede ser un fertilizante muy eficaz para mejorar la química del suelo y el rendimiento de los cultivos (Saletnik et al., 2018). Estos subproductos son alternativas a los combustibles fósiles e impulsan la sostenibilidad de la producción de biocarbón y ofrecen beneficios ambientales adicionales.

El argumento principal contra la producción de biocarbón es que el biocarbón como tal y las cenizas contenidas en él, podrían tener efectos nocivos. En los suelos, se puede presentar contaminación por metales pesados o hidrocarburos aromáticos policíclicos, elevar el pH a niveles intolerables para algunas plantas, disminuir la cantidad de la materia orgánica verde e interrumpir los ciclos de nutrientes internos logrando una disminución de los microorganismos en el suelo (Six, 2014).

De manera similar, hay poca información disponible que explique cómo se elimina el biocarbón una vez ha cumplido su propósito de adsorber metales pesados y otros contaminantes de las aguas contaminadas. Algunos elementos adsorbidos como nitrógeno, fósforo, potasio y otros minerales pueden recuperarse del biocarbón usado y reciclarse para su uso como fertilizantes.

Las investigaciones recientes se han centrado en el uso del biocarbón para el mejoramiento del suelo, enfocado en aumentar los rendimientos de los cultivos en el campo; un tema que está estrechamente relacionado con la sostenibilidad de la cadena alimentaria global.

En cuanto a los contaminantes orgánicos, se consideró que una de las tecnologías ampliamente propuestas era una combinación de fitorremediación con biocarbón. Se registró que los beneficios potenciales de las aplicaciones de biocarbón combinadas con la fitorremediación son la liberación de nutrientes como N, P, K y Ca (Sun et al., 2018). Tales aplicaciones no solo beneficiarían el rendimiento del cultivo, sino que también reducirían el uso de fertilizantes y ayudarían a la sostenibilidad económica. Se discutieron casos similares de contaminación por nitratos y pesticidas donde se usa biocarbón para disminuir la contaminación y el uso de aditivos químicos.

Sin embargo, los procesos empleados para descontaminar el biocarbón no se comprenden bien en la actualidad. Se necesita profundizar en el estudio de estos procesos para garantizar que el biocarbón contaminado no se convierta en sí mismo en un contaminante una vez que haya cumplido su propósito útil. El efecto prolongado de la aplicación de biocarbón sigue siendo un misterio y debe investigarse más a fondo.

b. Viabilidad económica

Los factores que se deben considerar al evaluar la viabilidad económica para la producción de biocarbón son los costos para obtener la materia prima, la investigación para determinar sus propiedades y funcionalidad, construcción y mantenimiento del equipo para la producción del biocarbón, transporte a la planta de procesamiento, eliminación de materiales no deseados, almacenamiento. De igual manera se necesita contemplarla mano de obra necesaria para llevar a cabo todos los procesos de producción, distribución, comercialización y venta del biocarbón.

Si existieran los suficientes incentivos económicos, queda por establecer si los productores de arroz, maíz, caña de azúcar, cítricos, etc., le darán la bienvenida a este nuevo mercado para vender los residuos de sus cultivos y evaluar si fuese económicamente viable obtener biomasa de esta manera. Sin embargo, si todos estos residuos se destinan a la producción de biocarbón esto podría aumentar los costos de adquisición.

5. Conclusiones del estudio

Se concluye que el proceso de carbonización mediante un gasificador *Top-Lit Up-draft* permite carbonizar la biomasa derivada de *Saccharum spontaneum L.* con un rendimiento de $26,71 \pm 0,62$ % el cual se encuentra en un límite recomendado, tomando en cuenta los rendimientos reportados por otros métodos de carbonización. Además, se visualiza el potencial para la retención de aniones en medios acuosos ácidos tomando en cuenta el carácter básico del biocarbón y la posible predominancia de cargas positivas en su superficie.

El estudio de biomasa natural para la biorremediación del agua contaminada con nitrato es una línea de investigación que es de reciente data. Se ha observado que es viable el uso de materiales generados en la agricultura, como aquellos que se obtienen de la naturaleza. En nuestro caso, hemos demostrado que la *Saccharum spontaneum L.* es una excelente fuente de carbono orgánico para la remoción biológica de nitrato.

Usar el material detrítico de la *Saccharum spontaneum L.* de forma directa en el agua para la biorremediación a resultado favorable y práctico su uso; sin embargo, es necesario continuar con más investigaciones para entender mejor la dinámica de liberación del carbono biodisponible que es aprovechado por las bacterias que se adhieren en estos materiales. Conocer con más claridad los procesos de colonización e hidrólisis (degradación) de la *Saccharum spontaneum L.*

6. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

Con el objetivo de producir biocarbón, se recomienda seleccionar un cultivo maduro de *Saccharum spontaneum L.* con un tallo de más de dos metros de altura. Una vez se cosecha, se debe secar a temperatura ambiente y bajo techo para evitar que la exposición a la radiación solar pueda afectar las propiedades del cultivo.

Dependiendo del tipo de máquina que se utilice para triturar la *Saccharum spontaneum L.* se recomienda emplear un tamiz mayor a 1 cm de diámetro para evitar la acumulación de fibras en la salida. De esta manera la trituración de la biomasa será rápida y se evita una sobre trituración de la misma que genera un polvo proveniente de la médula, el cual se ve reflejado en pérdida del material.

Para el tema de biorremediación es muy importante establecer un equilibrio en cuanto a contenido de humedad y disponibilidad de carbón biodegradable. En este sentido, lo más recomendable es usar la sección media del tallo de la *Saccharum spontaneum L.* porque en los análisis bromatológicos, así como en los ensayos batch, presentó las mejores condiciones. Por ejemplo, una menor proporción de nitrógeno, en comparación con la parte menos madura del tallo; o bien tubo más porcentaje de celulosa biodisponible y menos lignina que la sección baja del tallo. Por ahora, se recomienda su aplicación para biorremediación *in situ*, a través de barreras reactivas permeables, en aquellos lugares donde hay altas concentraciones de nitrato; por ejemplo, en zonas agrícolas. De igual forma, se podría emplear como un aportador de carbono orgánico para la desnitrificación de efluentes de plantas de

tratamiento de aguas residuales. Esto sería como tratamiento terciario aplicado como un filtro biológico. Es posible explorar su aplicación para remoción de otros contaminantes como sulfato que están presentes en los lixiviados de rellenos sanitarios o de la actividad minera.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) que en conjunto con el Sistema Nacional de Investigación (SNI), la Facultad de Ingeniería Mecánica y el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá impulsaron el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Ajmal, M., Hussain Khan, A., Ahmad, S., & Ahmad, A. (1998). Role of sawdust in the removal of copper(II) from industrial wastes. *Water Research*, 32(10), 3085–3091. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00067-0)
- Ali, I., & Gupta, V. K. (2007). Advances in water treatment by adsorption technology. *Nature Protocols*, 1(6), 2661–2667. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.370>
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, & American Public Health Association (APHA), A. W. W. A. (AWWA) & W. E. F. (WEF). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition*. In *Standard Methods*.
- Angin, D., & Şensöz, S. (2014). Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 16(7–8), 684–693. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.856842>
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. E. (1996). *Biología. La Vida en la Tierra*. In P. H. Hispanoamericana (Ed.), *Biología. La vida en la tierra*. (4th Editio). https://ecobiouvm.files.wordpress.com/2014/08/biologia_la_vida_en_la_tierra_pri_mera_parte-jb-decrypted.pdf
- Autoridad del Canal de Panamá. (2013). informe de cobertura vegetal y uso de suelo de la cuanca hidrografica del Canal de Panamá. Informe de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo de La Cuanca Hidrografica Del Canal de Panamá. <http://www.micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2012/06/Agua-y-Bosques.pdf>
- Baruah, J., Deka, R. C., & Kalita, E. (2020). Greener production of microcrystalline cellulose (MCC) from *Saccharum spontaneum* (Kans grass): Statistical optimization. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.158>
- Baum, E., & Weitner, S. (2006). BIOCHAR Application on Soils and Cellulosic Ethanol Production. Clean Air Task Force State Climate Network.
- Becerra, M. (2015). Manual del Carbón Activo MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO. https://www.academia.edu/9676941/Manual_del_Carbón_Activo_MANUAL_DEL_CARBÓN_ACTIVO

-
- Bolisetty, S., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2019). Sustainable technologies for water purification from heavy metals: review and analysis. *Chemical Society Reviews*, 48(2), 463–487. <https://doi.org/10.1039/c8cs00493e>
- Brown, R. C., del Campo, B., Boateng, A. A., Garcia-perez, M., & Mašek, O. (2015). Fundamentals of Biochar Production. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, 2nd Edition (Hardback) - Routledge.
- Capodici, M., Morici, C., & Viviani, G. (2014). Batch test evaluation of four organic substrates suitable for biological groundwater denitrification. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 43–48. <https://doi.org/10.3303/CET1438008>
- Carnovale, G., & Cuadra, J. (2004). The Brauer group of the dihedral group. *Glasgow Mathematical Journal*, 46(2), 239–257. <https://doi.org/10.1017/S0017089504001740>
- Cerezo, A. (2010). Antecedentes del origen y objetivo de la introducción de la maleza paja blanca (*Saccharum spontaneum* L.) a Panamá. Autoridad Del Canal de Panamá, Sección de Manejo de Cuenca, 6. <http://www.cich.org/publicaciones/01/paja-blanca-201003.pdf>
- Chandler, J. A., Jewell, W. J., & Gossett, J. M. (1980). Predicting methane fermentation biodegradability. *Biotechnology Bioengineering Symposium*, 93–107.
- Consejo Nacional del Agua. Gobierno de la República de Panamá. (2016). Plan Nacional de Seguridad Hídrica: Agua Potable para todos (2015-2050).
- Cuervo-López, F. D. M., Martínez-Hernández, S., Texier, A. C., & Gómez, J. (2009). Principles of denitrifying processes. In IWA Publishing (Ed.), *Environmental Technologies to Treat Nitrogen Pollution* (First Edit, p. 420).
- Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy and Fuels*, 18(2), 590–598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>
- Dangol, D. (2005). Species Composition, Distribution, Life Forms and Folk Nomenclature of Forest and Common Land Plants of Western Chitwan, Nepal. *Journal of the Institute of Agriculture and Animal Science*, 26, 93–105. <https://doi.org/10.3126/jiaas.v26i0.662>
- Deago, E. M., & Pizarro, G. E. (2013). Denitrification of drinking water using *Saccharum spontaneum* L. as a natural organic solid substrate. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.115>
- Deago, E. M. (2014). Desnitrificación biológica usando sustratos sólidos orgánicos naturales como donante de electrones y fuente de carbono. (Ph. D.). Pontificia Universidad Católica e Chile, Chile.
- Devnani, G. L., & Sinha, S. (2019). Extraction, characterization and thermal degradation kinetics with activation energy of untreated and alkali treated *Saccharum spontaneum* (Kans grass) fiber. *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.042>
- Duarte R., E., Olivero Verbel, J., & Jaramillo Colorado, B. (2009). Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosán obtenido de desechos de camarón. *Scientia et Technica*, 2(42), 290–295. <https://doi.org/10.22517/23447214.2679>
-

-
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnosis and analysis of factors influencing the vulnerability of drinking water sources in Mexico City, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409–427. <https://doi.org/10.18268/bsgm2016v68n3a3>
- Filter, J., Bosinsky, C., Kilinc, S. O., Ruhl, A. S., & Jekel, M. (2020). In-situ fixed bed denitrification in sequential biofiltration: Laboratory testing of solid substrates. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 394–404. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.005>
- Foglar, L., Sipos, L., & Bolf, N. (2007). Nitrate removal with bacterial cells attached to quartz sand and zeolite from salty wastewaters. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(11), 1595–1603. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9405-8>
- Gibert, O., Pomierny, S., Rowe, I., & Kalin, R. M. (2008). Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). *Bioresource Technology*, 99(16), 7587–7596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.012>
- Greenan, C. M., Moorman, T. B., Kaspar, T. C., Parkin, T. B., & Jaynes, D. B. (2006). Comparing Carbon Substrates for Denitrification of Subsurface Drainage Water. *Journal of Environmental Quality*, 35(3), 824–829. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0247>
- Han, Y., Boateng, A. A., Qi, P. X., Lima, I. M., & Chang, J. (2013). Heavy metal and phenol adsorptive properties of biochars from pyrolyzed switchgrass and woody biomass in correlation with surface properties. *Journal of Environmental Management*, 118, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.001>
- Hashemi, S. E., Heidarpour, M., & Mostafazadeh-Fard, B. (2011). Nitrate removal using different carbon substrates in a laboratory model. *Water Science and Technology*, 63(11), 2700–2706. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.518>
- International Biochar Initiative. (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. In *International Biochar Initiative*.
- IRENA. (2018). Evaluación del estado de preparación de las energías renovables: Panamá.
- James, A. M. R., Yuan, W., Wang, D., Wang, D., & Kumar, A. (2020). The effect of gasification conditions on the surface properties of biochar produced in a top-lit updraft gasifier. *Applied Sciences* (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/app10020688>
- James R, A. M., Yuan, W., Boyette, M. D., & Wang, D. (2018). Airflow and insulation effects on simultaneous syngas and biochar production in a top-lit updraft biomass gasifier. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.034>
- James Rivas, A. M. C. (2015). Simultaneous Biochar and Syngas Production in a Top-Lit Updraft Biomass Gasifier.
- Jones, E. R., Wishnie, M. H., Deago, J., Sautu, A., & Cerezo, A. (2004). Facilitating natural regeneration in *Saccharum spontaneum* (L.) grasslands within the Panama Canal Watershed: Effects of tree species and tree structure on vegetation recruitment patterns. *Forest Ecology and Management*, 191(1–3), 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.002>
-

-
- Kaith, B. S., Jindal, R., Jana, A. K., & Maiti, M. (2010). Development of corn starch based green composites reinforced with Saccharum spontaneum L fiber and graft copolymers - Evaluation of thermal, physico-chemical and mechanical properties. *Bioresource Technology*, 101(17), 6843–6851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.113>
- Kammen, D. M., & Lew, D. J. (2005). Review of Technologies for the Production and Use of Charcoal. In *Renewable and Appropriate Energy Laboratory Report*. <http://rael.berkeley.edu/sites/default/files/very-old-site/Kammen.charcoal.pdf>
- Kapoor, A., & Viraraghavan, T. (1997). Nitrate Removal From Drinking Water—Review. *Journal of Environmental Engineering*, 123(4), 371–380. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1997\)123:4\(371\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1997)123:4(371))
- Karataş, A. E., & Gülder, Ö. L. (2012). Soot formation in high pressure laminar diffusion flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(6), 818–845. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.003>
- Kosmulski, M. (2004). pH-dependent surface charging and points of zero charge II. Update. *Journal of Colloid and Interface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.029>
- Lee, Y., Eum, P. R. B., Ryu, C., Park, Y. K., Jung, J. H., & Hyun, S. (2013). Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of *Geodae-Uksae 1*. *Bioresource Technology*, 130, 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.012>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2012). Biochar for environmental management: Science and technology. In *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Vol. 9781849770, pp. 1–416). <https://doi.org/10.4324/9781849770552>
- Li, G., Chen, J., Yang, T., Sun, J., & Yu, S. (2012). Denitrification with corncob as carbon source and biofilm carriers. *Water Science and Technology*, 65(7), 1238–1243. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.960>
- Maiti, M., Kaith, B. S., Jindal, R., & Jana, A. K. (2010). Synthesis and characterization of corn starch based green composites reinforced with *Saccharum spontaneum* L graft copolymers prepared under micro-wave and their effect on thermal, physico-chemical and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 95(9), 1694–1703. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.024>
- Manassaram, D. M., Backer, L. C., Messing, R., Fleming, L. E., Luke, B., & Monteilh, C. P. (2010). Nitrates in drinking water and methemoglobin levels in pregnancy: A longitudinal study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 9. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-60>
- Martinez, S. E., Escolero, O., & Wolf, L. (2011). Total Urban Water Cycle Models in Semiarid Environments-Quantitative Scenario Analysis at the Area of San Luis Potosi, Mexico. *Water Resources Management*, 25(1), 239–263. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9697-6>
- Matějů, V., Čížinská, S., Krejčí, J., & Janoch, T. (1992). Biological water denitrification-A review. In *Enzyme and Microbial Technology*. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(92\)90062-S](https://doi.org/10.1016/0141-0229(92)90062-S)
- McLaughlin, S. B., & Walsh, M. E. (1998). Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 14(4), 317–324. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10066-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10066-6)
-

-
- Melillo, J. M., Aber, J. D., Linkins, A. E., Ricca, A., Fry, B., & Nadelhoffer, K. J. (1989). Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil*, 115(2), 189–198. <https://doi.org/10.1007/BF02202587>
- MICI. (1999). Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99 sobre los requisitos generales y definiciones del agua potable, que tiene por objeto establecer los requisitos físicos, químicos, biológicos y radiológicos que debe cumplir el agua potable.
- Mohammed, F. M., Roberts, E. P. L., Hill, A., Campen, A. K., & Brown, N. W. (2011). Continuous water treatment by adsorption and electrochemical regeneration. *Water Research*, 45(10), 3065–3074. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.023>
- Mohan, D., Singh, P., Sarswat, A., Steele, P. H., & Pittman, C. U. (2015). Lead sorptive removal using magnetic and nonmagnetic fast pyrolysis energy cane biochars. *Journal of Colloid and Interface Science*, 448, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.12.030>
- Moya Roque, R. (2018). Uso de la biomasa forestal y resultados de propiedades dendroenergéticas para especies de interés. In *Bcie*. https://fondohondurasespana.bcie.org/fileadmin/fhe/espanol/archivos/publicaciones/Educacion_Superior/6_Intro_Uso_Biomasa_Forestal_Resultados_Dendroenerg.pdf
- Ovez, B. (2006). Batch biological denitrification using *Arundo donax*, *Glycyrrhiza glabra*, and *Gracilaria verrucosa* as carbon source. *Process Biochemistry*, 41(6), 1289–1295. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.12.030>
- Pandey, V. C., Bajpai, O., Pandey, D. N., & Singh, N. (2015). *Saccharum spontaneum*: an underutilized tall grass for revegetation and restoration programs. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 62(3), 443–450. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0208-0>
- Peterson, S. C., & Jackson, M. A. (2014). Simplifying pyrolysis: Using gasification to produce corn stover and wheat straw biochar for sorptive and horticultural media. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.028>
- Peyton, B. M., Mormile, M. R., & Petersen, J. N. (2001). Nitrate Reduction with *Halomonas campisalis*: Kinetics of denitrification at pH 9 and 12.5% NaCl. *Water Research*, 35(17), 4237–4242. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00149-X)
- Radovic, L. R., Moreno-Castilla, C., & Rivera-Utrilla, J. (2000). Carbon materials as adsorbents in aqueous solutions. *Chemistry and Physics of Carbon*. <https://doi.org/10.1201/9781482270129-11>
- Ramírez-Godínez, J., Beltrán-Hernández, I., Álvarez-Hernández, A., Coronel-Olivares, C., Contreras-López, E., Quezada-Cruz, M., & Vázquez-Rodríguez, G. (2015). Evaluation of Natural Materials as Exogenous Carbon Sources for Biological Treatment of Low Carbon-to-Nitrogen Wastewater. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2015/754785>
- Rebolledo, A. E., López, G. P., & Moreno, C. H. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza , historia , fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382.
-

-
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications* (Florida: Taylor & Francis Group (ed.); 1st ed.).
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Application* (McGraw-Hill (ed.)).
- Rodríguez, F. (2007). El carbón activado como adsorbente universal. In *Sólidos porosos. Preparación, caracterización y aplicaciones*.
- Rodríguez, P., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2010). Influencia del pH sobre la adsorción en carbón activado de Cd(II) Y Ni(II) desde soluciones acuosas. *Revista Colombiana de Química*.
- Roig, B. (2006). Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo.
- Sadaka, S., Sharara, M. A., Ashworth, A., Keyser, P., Allen, F., & Wright, A. (2014). Characterization of biochar from switchgrass carbonization. *Energies*, 7(2), 548–567. <https://doi.org/10.3390/en7020548>
- Sala, L., García, S., González, J., Fascaroli, M., & Bellú, S. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Biosorción Para La Eliminación de Metales Pesados En Aguas de Desecho*, 106(2), 114–120.
- Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Czernicka, M., & Puchalski, C. (2018). Biochar and biomass ash as a soil ameliorant: The effect on selected soil properties and yield of giant miscanthus (*Miscanthus x giganteus*). *Energies*, 11(10), 2535. <https://doi.org/10.3390/en11102535>
- Sailling, W. J. B., Westerman, P. W., & Losordo, T. M. (2007). Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations. *Aquacultural Engineering*, 37(3), 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.06.003>
- Samantray, R., & Mishra, S. C. (2020). Saccharum spontaneum, a precursor of sustainable activated carbon: Synthesis, characterization and optimization of process parameters and its suitability for supercapacitor applications. *Diamond and Related Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107598>
- Sanders, W. T. M., Geerink, M., Zeeman, G., & Lettinga, G. (2000). Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates. *Water Science and Technology*, 41(3), 17–24. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0051>
- Saravanakumar, A., Haridasan, T. M., Reed, T. B., & Bai, R. K. (2007). Experimental investigation and modelling study of long stick wood gasification in a top lit up-draft fixed bed gasifier. *Fuel*, 86(17–18), 2846–2856. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.028>
- Schmid, R., Holm, L., Doll, J., Holm, E., Pancho, J., & Herberger, J. (1998). World Weeds: Natural Histories and Distribution. In *Taxon* (Vol. 47, Issue 1). <https://doi.org/10.2307/1224058>
- Schoeman, J. J., & Steyn, A. (2003). Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa. *Desalination*, 155(1), 15–26. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00235-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00235-2)
- Six, J. (2014). Biochar: Is there a dark side? <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2014/04/biochar-is-there-a-dark-side.html>
- SNE. (2015). *Plan Energético Nacional (2015-2050)*.
-

-
- Soest, P. J. V. (1963). Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. II. A Rapid Method for the Determination of Fiber and Lignin. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 46, 829–835. <https://doi.org/10.1093/jaoac/46.5.829>
- Spears, S. (2018). What is biochar? *Regeneration International*. <https://regenerationinternational.org/2018/05/16/what-is-biochar/>
- Sun, W., Zhang, S., & Su, C. (2018). Impact of Biochar on the Bioremediation and Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s in Soil. In *Advances in Bioremediation and Phytoremediation*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70349>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Van Soest, P. J. (1996). Environment and forage quality. *Proceedings Cornell Nutrition Conference*, 1–9.
- Wang, J., & Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1103–1112. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.07.001>
- WTW, M. . (1998). *Operating Manual*. Systmen OxiTop ® Control Germany.
- Xu, Y., Qiu, T. L., Han, M. L., Li, J., & Wang, X. M. (2011). Heterotrophic denitrification of nitrate-contaminated water using different solid carbon sources. *Procedia Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.013>
- Yao, Z., Wang, C., Song, N., & Jiang, H. (2019). Development of a hybrid biofilm reactor for nitrate removal from surface water with macrophyte residues as carbon substrate. *Ecological Engineering*, 128, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.010>
- Zhang, D., Zhang, X., Wang, Y., Zhou, G., & Li, G. (2015). Innovative slow-release organic carbon-source material for groundwater in situ denitrification. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(7), 909–919. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.966767>

CASO IX. Valorización energética de residuos de la industria, una medida de mitigación del cambio climático

María Luisa Ojeda^{1*}, Juan Carlos Moreno², Humberto Vidal¹, Isabel Águila¹,
María Rosa Gallardo¹, Pedro Gallardo¹

¹ Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile

² Departamento Ingeniería Química, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile

Resumen. El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis ambiental de las emisiones generadas por combustibles líquidos, obtenidos de la valorización energética de residuos a través del proceso de esterificación química (producción de biodiesel), y su posterior utilización en motores de combustión interna, para generación de electricidad, en zonas apartadas de los centros urbanos. Luego de la producción de biodiesel de AVU (Aceites Vegetales Usados) y de aceite de Krill residual, se analizaron las emisiones en motor de combustión a diésel, empleando mezclas de biodiesel/diésel de 20%, 40%, 60%, 80% e incluso con un 100%, para ambos biocombustibles. Estos resultados se comparan con valores de referencia existentes en bibliografía, con el fin de evaluar las contribuciones a la atmósfera de este tipo de combustibles, obtenidos de la valorización energética de residuos de la industria alimenticia y pesquera (barcos factoría) de la región de Magallanes en la Patagonia chilena. Como resultados, se obtiene que los valores encontrados para CO y CO₂ en el caso de las emisiones de combustión de ambos biodiesel, se encuentran dentro del rango obtenido para motores a diésel con catalizador, sin embargo, las mezclas con biodiesel proveniente de AVU, son levemente menores. Para el SO₂, los valores obtenidos son del orden de 0 a 2 ppm, mucho menores comparados con valores de referencia de motores a diésel con catalizador.

*Correspondencia: María Luisa Ojeda. E-mail: maria.ojeda@umag.cl

1. Introducción

1.1. Contexto

Chile al igual que Latinoamérica, se encuentra avanzando en la transición desde una economía lineal a una circular, a través de acciones claras y concretas como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor. Según especialistas, dentro de los desafíos que tiene el país, se encuentra primero, lograr que el concepto sea diferenciado del simple reciclaje, y posteriormente incorporarlo a emprendimientos de las empresas e instituciones en general. Por otro lado, el Ministerio de Medio Ambiente, a partir de información de SINADER y SIDREP, sobre toneladas anuales de residuos por sector, coloca, al "sector pesquero" en el sexto lugar, y el sector "agricultura, ganadería, caza y silvicultura" en el octavo lugar. (Min. de Medio Ambiente, 2016).

El Ministerio de Energía, en la "Ruta Energética 2018-2022" (Min. de Energía, 2018), invita a realizar los esfuerzos para transitar a una economía baja en carbono, la cual demandará el desarrollo de nuevos modelos de negocio, que armonicen las dimensiones ambientales, sociales y económicas, como lo indica el "Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía" del mismo ministerio (Min. de Energía, 2017), que identifica al sector "industria y minería" como prioritario para aplicar medidas de eficiencia energética, de incremento en el uso de tecnologías de bajas emisiones, y/o bajas en carbono. Por lo indicado, el sector industrial es el foco del presente trabajo, y en particular, los sectores pesquero, y alimenticio (producción de alimentos preparados), de la región de Magallanes.

La Universidad de Magallanes, a través del Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), y del Depto. de Ingeniería Química, ambos de la Facultad de Ingeniería, han venido desarrollando varias iniciativas, con el apoyo empresarial regional, conducentes a investigar la factibilidad de generar combustibles líquidos, a pequeña escala para autoconsumo, a partir de varios residuos regionales, tales como sebo de oveja, aceite de krill, aceites usados de la industria alimenticia, entre otros, para autoconsumo de la empresa en sus procesos, o bien, para utilización en la generación de calor y electricidad en lugares apartados, donde posean instalaciones. Como resultado de algunas tesis de pregrado desarrolladas al alero de un proyecto con la empresa METHANEX CHILE SpA sobre biocombustibles (CERE-UMAG, 2017), se obtuvieron buenos resultados, asociados a considerar, por ejemplo, que el aceite de krill y el aceite usado de la industria de alimentación, son buenos precursores de biodiesel mediante el proceso químico tradicional, y que, con el sebo de oveja es necesario utilizar una vía de esterificación diferente. De igual modo, a través de proyecto FIC regional, "Desarrollo de biocombustibles a partir de valoración de residuos, como estrategia de innovación energética en la industria de Magallanes" (CERE-UMAG, 2019), se pudieron validar los resultados anteriores, mediante la producción química de biodiesel, y la producción enzimáticamente, empleando enzimas comerciales, evaluando características físico químicas del biodiesel, por ambos procesos, en comparación con lo indicado en normativa del Min. De Economía (2008).

1.2 Objetivos del capítulo

El objetivo general es presentar algunos de los resultados obtenidos en proyecto regional, tendiente a la obtención de las condiciones óptimas para la producción de biodiesel a partir de la valorización de productos residuales de la industria pesquera y alimenticia de la región, como estrategia de innovación energética al interior de las empresas. Dentro de los objetivos específicos, se tuvo el análisis para determinar las condiciones óptimas de producción de biodiesel por la vía química, empleando metanol e hidróxido de sodio, o de potasio, empleando dos tipos de materia prima: AVU (aceite vegetal usado) y aceite de krill, y la posterior evaluación de las variables operacionales para una producción a escala piloto, generando un sistema demostrativo. Se determinaron las características del biodiesel producido con relación al cumplimiento de estándares nacionales e internacionales, y su desempeño ambiental midiendo emisiones de CO, CO₂, H₂, O₂ y SO₂ en los gases de salida de un motor de combustión interna estacionario, similar al usado para generar electricidad en zonas rurales y/o aisladas.

2. Desarrollo

2.1. Metodología empleada

Producción de biocombustible líquido a partir de Aceites Vegetales Usados (AVU) y aceite de krill.

Para la obtención de los combustibles líquidos – biodiesel – se empleó planta piloto de esterificación química BioPro 380 con una capacidad de producción de hasta 380 litros en 24 horas continuas de trabajo (ver Figuras 1 y Figura 2), empleando como catalizadores para la esterificación 3.040 g de NaOH (o 4.700 g de KOH), 380 mL H₂SO₄ y 76 L de metanol. Además, se adicionan 350 L de agua dulce o fuente presurizada para el lavado del biodiesel. Este proceso requiere 24 horas adicionales.

Las materias primas empleadas fueron aceite de krill de la industria pesquera, y aceite vegetal usado (AVU) de la industria de alimentos. Los productos resultantes de la esterificación fueron lavados en el mismo equipo, adicionando 350 L de agua dulce o fuente presurizada. Este proceso de lavado requiere 24 horas adicionales. La producción de ambos biocombustibles líquidos resultantes, fueron evaluadas por separado.

Análisis de Gases de Combustión - biocombustibles

Se prepararon mezclas con un 20%, 40%, 60%, 80% del biocombustible producido y diésel de petróleo, para ambos productos. De igual forma, se realizaron evaluaciones de los biocombustibles puros (al 100%) y se compararon con diésel al 100%. Para la estimación de las emisiones, se utilizó un motor de combustión de generador diésel marca EINHELL RT-PG 5000 DD, facilitado por la empresa METHANEX Chile SpA (ver Figuras 2-a y 2-b) y un analizador de gases TESTO 340 para la medición de temperatura de gases, % de Oxígeno, CO (ppm), CO corregido (ppm), % de CO₂, %

Exceso de Aire, H_2 (ppm) y % SO_2 , para cada mezcla y combustibles puros, las cuales fueron registradas.

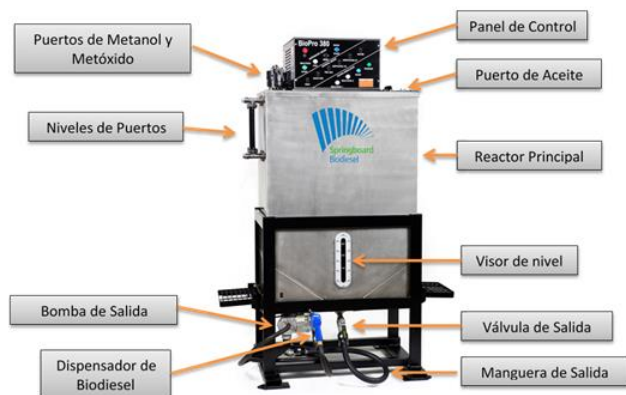


Figura 1. Planta Piloto de producción de biodiesel, Marca BioPro 380. Fuente: UMAG (2019); Fotos Departamento Ing. Química.



Figura 2. Vista de Planta Piloto de producción de biodiesel, y de operación de carga de planta. (Fuente: UMAG, 2019, Departamento Ing. Química).

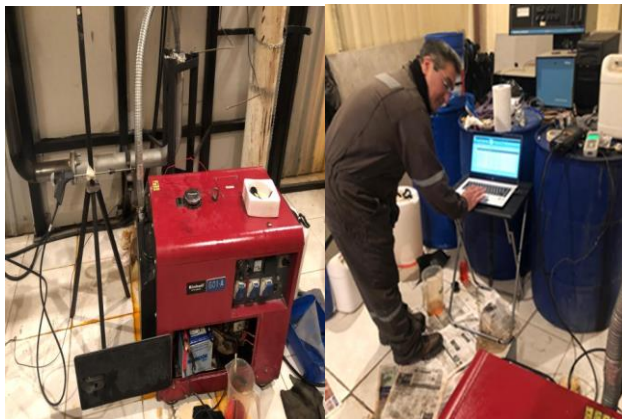


Figura 3. Vista de motor de combustión interna EINHHELL RT-PG 5000 DD; y de medición de emisiones de gases con equipo TESTO 340. (Fuente: UMAG, 2019, CERE)

2.2. Actividades desarrolladas y análisis de resultados

Las actividades desarrolladas corresponden a un conjunto de acciones en el marco de la línea estratégica de investigación de valorización energética de residuos, del CERE-UMAG y Dpto. Ing. Química, y con el apoyo del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (2017-2019) "Desarrollo de biocombustibles a partir de valoración de residuos, como estrategia de innovación energética en la industria de Magallanes".

Luego de la recopilación de información técnica sobre producción de combustibles líquidos tipo biodiesel, a partir de diferentes fuentes residuales mediante esterificación química, evaluando la calidad del material residual y las necesidades de reactivos para un mejor rendimiento en las reacciones de hidrólisis y esterificación en la producción de biodiesel, se realizaron ensayos de producción de biodiesel a escala piloto, y se evalúa el comportamiento ambiental de mezclas de biodiesel/diésel analizando las emisiones principalmente de CO, CO₂, O₂, H₂ y SO₂, y luego comparando con valores de referencia.

Algunos de los resultados, relacionados con las emisiones de gases de mezclas de biodiesel/diésel, en motor de combustión estacionario, se muestran en las Figuras 4, 5, 6, y 7. Con relación a CO y CO₂, el biocombustible obtenido a partir de AVU (Aceite Vegetal Usado) muestra resultados levemente mejores al presentar menores emisiones de estos gases que el biocombustible de aceite de krill (ver Figuras 4 y 5), sin embargo, este último generó la menor concentración de CO (419 ppm) para la mezcla al 40%, y ambos en estado puro presentaron igual concentración de CO (726

ppm). La mezcla al 40% también presentó un mayor porcentaje de oxígeno correspondiente a un 19,67 % (Figura 6). Por otro lado, ambos biocombustibles evidenciaron presencia de hidrógeno en los gases de combustión (Figura 7), con concentraciones mayores al utilizar los biocombustibles puros, sin mezcla con diésel, de hasta 171 ppm para biocombustible puro proveniente de AVU. Finalmente, para el SO₂, se encontraron valores muy bajos o nulos en las emisiones para ambos biocombustibles.

En la Tabla 1, se muestran los valores referenciales, para algunas emisiones de gases en motores de combustión interna de baja potencia estacionarios, que utilizan diésel de petróleo y poseen catalizadores, en comparación con los valores obtenidos para las emisiones con biodiésel de AVU y de aceite de krill, para las diferentes mezclas. Con ambas materias primas se obtienen valores muy bajos o nulos para SO₂, y valores dentro del rango para el CO, tal como se muestra también en la Figura 4. En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los valores obtenidos para otros gases como el CO₂, O₂ y H₂, respectivamente.

Tabla 1. Comparación de valores de emisiones con algunos trabajos publicados en la literatura.

Referencia	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	Aceite Krill CO (ppm)	Aceite Krill SO ₂ (ppm)	Aceite AVU CO (ppm)	Aceite AVU SO ₂ (ppm)
Nejar N. (2007)	150-1.500	10-150	419-1.157	0 - 2	637-860	0
Swiss Federal Council (2010)	650 (mg/m ³)					

Es importante mencionar, que en Chile sólo se declaran las fuentes móviles y las grandes fuentes fijas o estacionarias según lo que indica el D.S N°138 del MINSAL (Ministerio de Salud de Chile, 2005) y no los pequeños equipos de autogeneración (menores a 10 kW de potencia instalada).

Finalmente, en la Tabla 2 se muestran las características del biodiésel producido con ambas materias primas, comparado con la normativa chilena para calidad de biodiésel (Ministerio de Economía, 2008). Como se puede apreciar en general los valores para ambos tipos de biodiésel están dentro de los valores normados, pero llama la atención principalmente los valores para la estabilidad de oxidación en ambos productos, y el contenido de iones calcio en biodiésel de AVU, valores que se asocian al estado de la materia prima, y que deberán de revisarse con mayor detalle. Con relación al grado de transformación a ésteres de metilo, se puede apreciar que es levemente más bajo que lo permitido en el biodiésel de AVU.

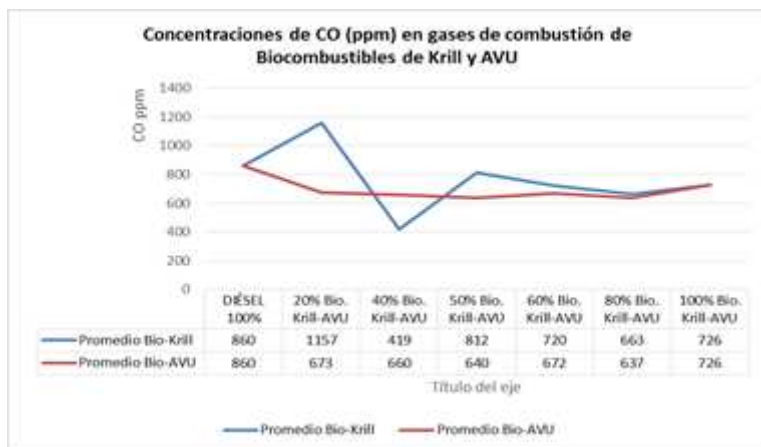


Figura 4. Resultados CO (ppm) con Biodiesel de AVU y de Aceite de Krill.

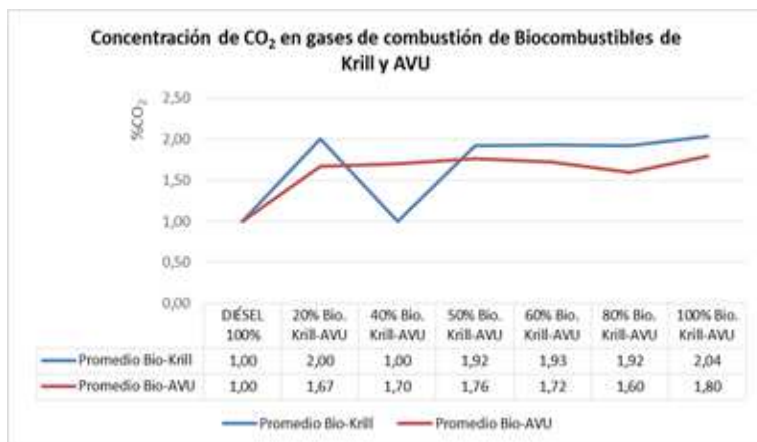


Figura 5. Resultados % de CO₂ con Biodiesel de AVU y de Aceite de Krill.

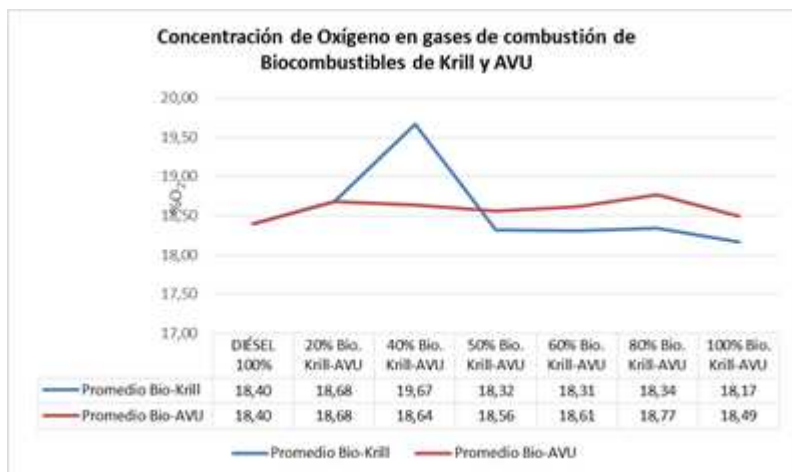


Figura 6. Resultados % de O₂ con Biodiesel de AVU y de Aceite de Krill.

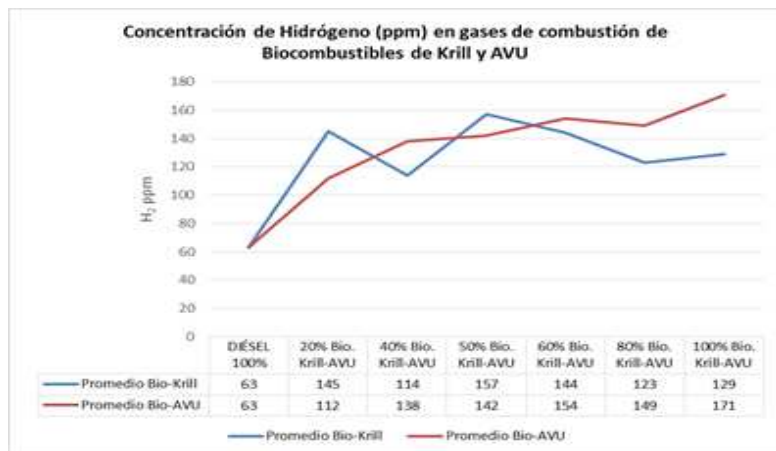


Figura 7. Resultados de H₂ (ppm) con Biodiesel de AVU y de Aceite de Krill.

Tabla 2. Especificaciones de calidad para Biodiesel

Propiedad	Norma Técnica	Unidad de Medida	Valor D.S N°11	Aceite AVU	Aceite Krill
Densidad a 15°C	NCh882 o NCh 2395	g/cm ³	mín. 0,86 Máx. 0,90	0,8864	0,8869
Viscosidad 40°C	NCh1950	mm ² /s (cST = centiStokes)	Mín. 3,5 Máx. 5,0	--	--
Punto de Inflamación	NCh 69	°C	mín. 120	186	178
Punto de Escurrimiento	NCh 1983	°C	Máx. -1	-3	0
Azufre total	NCh 2325 o NCh 1896	% masa	Máx. 0,005	6,3	3,5
Residuos del Carbono Conradson (CCR) 100%	ASTM D 4530 ³	% masa	Máx. 0,05	0,02	0,06
Contenidos de ceniza sulfatadas	ISO 3987 o ASTM D 874	% masa	Máx. 0,02	0,001	0,001
Agua y Sedimentos	NCh 1982	% volumen	Máx. 0,05	0,4	0
Corrosión de la lámina de Cobre (3hr a 50°C)	NCh 70	Grado de Corrosión	Máx. N°2	1a	1a
Valor de Neutralización (valor de ácido mg KOH/g)	EN 14104	mg KOH/g muestra	Máx. 0,5	0,14	0,35
Contenido de éster	EN 14103	% masa	Mín. 96,5	95,6	98,1
Contenido de Metanol	EN 14110	% masa	Máx. 0,20	--	--
Glicerina Libre	EN 14105 o EN 14106	% masa	Máx. 0,02	--	--
Glicerina Total Fósforo	EN 14105	% masa	Máx. 0,25	--	--
Fósforo	ASTM D 5185 o EN 14107	mg/kg	Máx. 10	<0,1	<0,1
Contenidos Alcalinos (Na+K)	EN 14109 o EN 14538	mg/kg	Máx. 5	<0,1	<0,1
Contenido de Metales (Ca+Mg)	ASTM D 5185 o EN 14538	mg/kg	Máx. 5	11,1(*)	0,2
Estabilidad a la Oxidación a 110°C	EN 14112	horas	Mín. 6	2,5	(**)

(*)El valor para Ca++ fue de 11; (**) Fuera de alcance de norma.

3. Conclusiones del estudio

Las máximas concentraciones de monóxido de carbono que presentan las emisiones del motor de combustión interna, con ambos biocombustibles se encuentran dentro del rango, con relación a emisiones de motores a diésel con catalizador referenciados.

Los valores levemente mayores en las emisiones obtenidas con biodiesel de aceite de krill, se pueden deber a algunos interferentes presentes, generados en la esterificación, lo que se debe comprobar a futuro, considerando que se trabajó con productos crudos, sin purificar.

Ambos productos biocombustibles líquidos, resultan a la fecha, convenientes desde el punto de vista ambiental, dada las bajas o casi nulas concentraciones de SO₂ encontradas, y presentan posibilidades de mejora en cuanto a las concentraciones de CO y CO₂, una vez que se trabaje en la combustión con productos más refinados.

4. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

En general, la sustitución de diésel fósil, por biodiesel generado con residuos, se aprecia como un modelo de valorización energética que permitirá en un futuro próximo, una mejor gestión energética y ambiental en las empresas, apuntando a un modelo de economía circular (Min. de Medio Ambiente, 2020), pero se deben seguir analizando algunas consideraciones en el proceso de producción por la vía química, sobre todo del estado de la materia prima, con relación a su grado de oxidación que puede incidir en la calidad del producto final, como también la presencia de algunos iones que no intervienen en las reacciones de esterificación.

Con relación a la disponibilidad de la materia prima, en este caso de estudio, provenientes del aceite de krill y de AVU, es importante mencionar que posterior al desarrollo del proyecto, la empresa pesquera involucrada, comenzó a comercializar el aceite de krill para la industria farmacológica, con un alto valor agregado, lo que deja fuera las posibilidades de su conversión a biodiesel. Los AVU en cambio, siguen siendo una alternativa de generación de biodiesel, puesto que la producción de alimentos preparados, sigue siendo viable, generando una problemática cada vez mayor para su eliminación. Al respecto existe la posibilidad de que los municipios puedan incorporar algún proyecto de producción de biodiesel que les permita reutilizar este combustible en sus instalaciones, con un sistema de recolección incluido, adquiriendo un equipo similar al utilizado, que provee 380 litros de biodiesel cada 48 horas. Esto se encuentra en etapa de evaluación, considerando la situación de pandemia que todavía se tiene en la región y en el país.

En Chile, se debe seguir avanzando en la elaboración de regulaciones adecuadas para la aplicación de biodiesel en equipos a pequeña escala que vengán a solucionar los déficit energéticos en zonas rurales o aisladas, y en la búsqueda de modelos de recolección y gestión del aceite residual, que proporcionen una atractiva relación

costo-beneficio, a quienes entreguen el servicio de conversión a biodiesel, pero que a su vez, cumplan con las consideraciones ambientales y de sostenibilidad necesarias, para impulsar la economía circular en las empresas, ojala micro y PYMES.

Existen equipos como el mostrado en este ejemplo de aplicación, disponibles en el mercado, de fácil utilización, y con costos que pueden ser asumidos por algunas PYMES. De igual forma, existe equipamiento que complementa al equipo BIOPRO 380, haciendo que este sea más eficiente y la producción de biodiesel demore la mitad de tiempo, lo que podría ser conveniente si la demanda por biodiesel aumentara. Con relación a la mano de obra, y/o servicios de mantenimiento, no existen a nivel local, si a nivel nacional, principalmente en la capital Santiago de Chile. Las universidades regionales, que han desarrollado I+D+i, en esta materia, juegan un rol preponderante en la promoción y difusión de la tecnología, y en la generación de capacidades locales en los programas de pregrado para profesionales y técnicos.

En evaluación económica realizada, considerando 3 escenarios posibles (Escenario 1: Producción para autoconsumo; Escenario 2: Producción para venta; Escenario 3: Servicio de producción), la opción más factible fue la de ofrecer el servicio de producción de biodiesel, puesto que al no comprar el insumo correspondiente a la materia prima (AVU u otro aceite residual), se obtienen mejores resultados. Sin embargo, la posibilidad de contar con algún tipo de financiamiento externo o subsidio, al inicio del posible negocio, que permita reducir la inversión, la recuperación se obtiene en un periodo menor, o bien, se genera una mayor ganancia, lo que podría ser conveniente para pequeñas empresas que puedan optar por este servicio, vendiendo el biodiesel generado.

Considerando esta última opción, hay que tener las siguientes consideraciones:

- Que el equipo sea dedicado a la producción de biodiesel para su comercialización.
- La producción depende del servicio entregado para la obtención de biodiesel. En este caso, no se compra el aceite, sino que es entregado por quien requiera el servicio.
- Como producto se entrega el biodiesel y la glicerina en la proporción de la producción, es decir la glicerina no se comercializa en forma independiente.
- El valor del diésel de petróleo de \$648 pesos (al 30 de septiembre 2019).
- La venta de biodiesel está exento del impuesto específico a los combustibles.
- Si se considera algún tipo de capital para emprendimiento, este cálculo puede ser favorable.

Al realizar las evaluaciones correspondientes al flujo de caja, el escenario de entrega de servicio es factible, en la medida de que el reactor trabaje a su capacidad máxima. Se debe considerar además que, para un buen funcionamiento del servicio, debe existir una gran demanda por el producto, suponiendo que al mes se tendrán los insumos para 8 operaciones de la planta, y finalmente considerar que el AVU sea entregado por la entidad que requiera el servicio. Con todas las consideraciones

explicitadas, para un VAN cercano a cero el valor mínimo que se puede cobrar por el biodiesel es de \$681 pesos/L (pesos chilenos por litro), ya que un valor menor a este significaría una pérdida considerable para el servicio. Con las características evaluadas la TIR es de un 12%, con una recuperación de la inversión en el año 7.

Existen variadas opciones para que la entrega del servicio sea factible y se viera como un buen plan de negocio, además de la valoración ambiental asociada a la descontaminación del medio ambiente por el uso de un biocombustible con menores emisiones, y de la reutilización de un residuo como el aceite vegetal usado, que hoy sigue siendo un problema para los productores de alimentos.

Finalmente, las limitaciones del uso del biodiesel en Chile, siguen estando asociadas al sector transporte, puesto que por el D.S N°11/2008 del Ministerio de Economía, sólo se permite utilizar, mezclas tipo B2 y B5 (2% y 5% de biodiesel, respectivamente). Igual se espera en un futuro cercano, que puedan aumentar las exigencias para las emisiones de pequeños equipos electro generadores, que hoy son utilizados en zona rurales.

Agradecimientos

Al Gobierno Regional de Magallanes, por su aporte al proyecto "Desarrollo de biocombustibles a partir de valoración de residuos, como estrategia de innovación energética en la industria de Magallanes", a través del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional – FIC-R (2017-2019); y a las empresas Methanex Chile SpA., y DERIS.S.A, por sus aportes en materiales y discusión.

Referencias

- CERE-UMAG (2017), "Investigación de Operación de Motores con mezclas de Diésel/Biodiesel y Gasolina/Metanol como combustibles, y producción experimental vía química de biodiesel a partir de sebo de oveja y aceite de krill. Aplicaciones en celdas de combustible", proyecto, financiado por METHANEX CHILE SpA. Punta Arenas, Chile, y desarrollado por Centro de Estudio de los recursos Energéticos, Facultad de Ingeniería de Universidad de Magallanes.
- MINISTERIO DE ECONOMÍA, FOMENTO Y RECONSTRUCCIÓN (2008), Decreto N°11 que "Aprueba definiciones y especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de bioetanol y biodiesel. <https://www.leychile.cl/n?i=271031&f=2008-05-09&p=>
- Ministerio de Energía (2017), documento de "Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía". Santiago de Chile. Revisado en Agosto 2019: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/plan-mitigacion-gei-sector-energia-2017.pdf>
- Ministerio de Energía (2018), documento "Ruta Energética 2018-2022". Santiago de Chile. Revisado en Agosto 2019: <https://energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>

-
- Ministerio de Medio Ambiente (2016), Informe "Cuarto Reporte del estado del Medio Ambiente". Capítulo de Residuos en Chile. Revisado en Julio 2019. <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/Cuarto-report-e-del-medio-ambiente-compressed.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente y otros (2020), Informe "Propuesta Hoja de Ruta Nacional a la Economía Circular para un Chile sin Basura 2020 -2040". Santiago de Chile. Revisado en Mayo 2021. <https://economieircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/12/Propuesta-Hoja-de-Ruta-Nacional-a-la-Economia-Circular-para-un-Chile-sin-Basura-2020-2040.pdf>
- Nejar, N., (2007). "Catalizadores bimetálicos basados en potasio para la eliminación de NOx y carbonilla, procedentes de motores diésel". Tesis Doctoral Depto. de Química Inorgánica. Universidad de Alicante, España.
- Swiss Federal Council (2010),"Ordinance on Air Pollution Control (OAPC)". Versión refundida en julio 2010 a partir de documento de diciembre 1985.suiza.
- CERE - UMAG (2019), Informes de Resultados de Emisiones, y de Evaluación Económica, Proyecto FIC – R 2017 "Desarrollo de biocombustibles a partir de valoración de residuos, como estrategia de innovación energética en la industria de Magallanes", apoyado por Fondo de Innovación para la Competitividad Regional y desarrollado por Centro de Estudio de los Recursos Energéticos, Facultad de Ingeniería de Universidad de Magallanes.

SECCIÓN III:

**PROCESOS Y TECNOLOGÍAS
EXITOSOS EN EL USO DE LA
BIOMASA**



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Sección III, 2021: 212-214
ISBN: 978-84-15413-40-0

III. PROCESOS Y TECNOLOGÍAS EXITOSOS EN EL USO DE LA BIOMASA

José María Sánchez Hervás¹

1. Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible, CIEMAT, 28040, Madrid, España.

Introducción a la Sección III

En un contexto global, la bioenergía es clave para lograr alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030, adoptados en 2015 por los líderes mundiales. Se ha identificado que la biomasa contribuye al menos a los ODS 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13 y 15.

De igual manera, el camino hacia el cumplimiento de los objetivos energéticos de renovables para 2030 y la completa descarbonización en 2050, pasa por incluir a la biomasa en el mix de fuentes energéticas. Es un recurso local presente en distintas formas en todos los territorios. Constituye una energía gestionable y asequible, reactiva economías locales, favorece la creación y fijación de empleo, especialmente en las zonas rurales. Y, al mismo tiempo, enfocado hacia el concepto de bioindustria, la biomasa puede constituirse como alternativa sostenible a una variedad de materiales que se han venido produciendo mediante un origen fósil.

En el marco de Iberoamérica, la bioenergía, el desarrollo de tecnologías asociadas a su utilización eficaz en un modo sostenible, su adecuación a las diferentes realidades de cada país y su implantación en cada emplazamiento concreto, ha de ser un motor económico y vertebrador de las regiones. Esto incluye los múltiples sectores, desde

rural y periurbano, pasando por industriales, hasta el uso eficiente de la biomasa en ciudades.

El libro "Recursos, tecnologías, transferencia y políticas: Una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía en Iberoamérica", recoge una excelente revisión del estado actual de la bioenergía en la región iberoamericana. Se identifican fortalezas, oportunidades, amenazas y debilidades. En específico, en su sección II: Tecnologías de Biomasa (Contreras, M. L et al., 2020), se introduce la definición de biocombustibles sólidos y se discuten las principales tecnologías de conversión térmica de biomasa, combustión, gasificación y pirólisis. Se realiza un análisis crítico del uso de la biomasa con fines energéticos. Desde aplicaciones sencillas de uso térmico a escala doméstica a complejas como producción eléctrica, cogeneración, calor y electricidad y trigeneración, para producción combinada de calor, frío y electricidad.

En Iberoamérica, el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía primaria presenta en la actualidad un reparto desigual. En algunos países es una de las energías renovables más fomentada, especialmente para uso térmico. Otros, especialmente en zonas rurales y en comunidades aisladas siguen dependiendo del uso tradicional de combustibles (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas o residuos animales) para cocinar y calentarse. Se prevé un importante crecimiento de la demanda energética en los próximos años, por lo que eliminar el uso ineficiente de la biomasa es una necesidad urgente. En consecuencia se debe hacer una apuesta energética, económica y social futura en Iberoamérica asociada a la biomasa.

Estudios de caso incluidos en esta Sección

No obstante lo anterior, existe en Iberoamérica un claro movimiento de potenciación de la bioenergía. En los siguientes epígrafes de la sección se presentan un número relevante de ejemplos concretos de utilización de la biomasa en países que conforman la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural, REBIBIR (T). Se ofrece una mirada desde múltiples perspectivas. Se abarcan aplicaciones a escala humana en localizaciones aisladas y aplicaciones a gran escala como las redes de generación de calor distrital.

Se parte con dos ejemplos de preparación de biocombustibles sólidos mediante torrefacción y pelletización. Ambos a partir de residuos biomásicos. El primero a partir de residuos de poda para su uso en co-combustión en la ciudad de Bogotá, sustituyendo parcialmente combustible fósil. El segundo enfocado al aprovechamiento de residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar en Argentina.

A continuación se analizan casos de aplicación de las diferentes tecnologías de conversión. Un ejemplo muy interesante es el desarrollo de economías locales, basadas en el uso eficiente de la biomasa. Un modelo muy ilustrativo se analiza en la contribución sobre apropiación de tecnologías eficientes y de bajo costo para el uso de residuos de poda para cocinar y calefaccionar.

Se incluye un caso de pirólisis y de producción de biochar, carbón vegetal, en Argentina, enmarcado en los dendrocombustibles, mediante valorización de residuos derivados del manejo forestal y su industria. Otro ejemplo de uso de desechos de madera se refiere a su gasificación y utilización en motor de combustión interna para generación eléctrica a pequeña escala. Su aplicación se sitúa en la región de la Patagonia chilena y su objetivo en la sustitución de generadores diésel en comunidades aisladas.

El aprovechamiento de los propios residuos para generación de energía térmica y eléctrica de uso interno se ejemplifica para una industria de producción de cerveza artesana, en Madrid, España. Como recurso biomásico se aprovecha el bagazo generado por la propia industria y la tecnología seleccionada para su transformación termoquímica es la gasificación.

Por último se entrega un caso de red distrital de calor. Es una muestra de aprovechamiento de biomasa residual autóctona para producción centralizada de agua caliente sanitaria y de calefacción. El caso concreto fue la primera red de calor de carácter institucional funcionando con biomasa forestal en España. Su gran contribución medioambiental a la producción de energía, además de las ventajas sociales y desarrollo de actividades alternativas en zonas agrícolas y forestales, hacen que esta instalación sirva de modelo para su desarrollo en otras poblaciones con potencial de biomasa.

Los casos de estudio recogidos en esta sección constituyen una selección de las posibilidades y realidades de la bioenergía en Iberoamérica. Pretenden ser fuente de inspiración y motivación para su replicación en otros países. También proporcionar sugerencias, consejos y compartir experiencias para su adaptación a realidades variadas y singularidades de otras localizaciones específicas. Y por último, para facilitar pautas para desarrollar una estrategia en bioenergía en las regiones y los países que conforman Iberoamérica.

Referencias

Contreras, M. L., Bahillo Ruíz, A., & Sánchez, J. M. (2020). SECCION II: Tecnologías de Biomasa. En: Recursos, tecnologías, transferencia y políticas: Una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía en Iberoamérica. Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). 270 pg. ISBN 978-84-15413-32-5. CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). Madrid, España. (Descarga: <http://www.cytmed.org/es/biblioteca/primer-libro-de-la-red-rebibir-t>).



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso X, 2021: 215-228
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO X. Torrefacción de biomasa residual forestal proveniente de podas en la ciudad de Bogotá y su uso en co-combustión

José M. Rincón¹, Pedro O. Guevara¹, Jessica A. Agresott¹, Diana M. Durán¹,
Alfonso Maestre²

¹ Centro de Desarrollo Industrial CDI, Bogotá, 110111, Colombia

² ENEL, Bogotá, 110111, Colombia

Resumen. La biomasa residual (BR) juega un papel importante en la producción de energía sustentable debido a que es un recurso renovable, abundante y económico. Algunas propiedades de la BR como el alto porcentaje de humedad y baja densidad energética son un obstáculo para su aplicación en producción energética como combustibles sólidos; por esta razón es importante aplicar pretratamientos como el briqueteado, pelletizado o la torrefacción. Este trabajo estudió el proceso de torrefacción de biomasa residual forestal producida por podas preventivas en la infraestructura eléctrica de la ciudad de Bogotá y se evalúa su uso en co-combustión con carbón mineral a nivel planta piloto. Se encontró que la torrefacción mejora las propiedades físicas y químicas de la BR como combustible facilitando su molienda e integración con carbón; adicionalmente se evidenció que la biomasa torrefactada (BT) mejora la calidad de la combustión del carbón disminuyendo el porcentaje de cenizas y la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los cálculos financieros mostraron que el uso de BT generada en la ciudad de Bogotá en co-combustión con carbón es rentable para su aplicación en la planta de generación de energía eléctrica con una TIR del 23% para un periodo de repago de 4.35 años.

*Correspondencia: José Rincón Martínez. Email: joserinconmartinez@gmail.com

1. Introducción

La bioenergía, se puede definir como la energía renovable (ER) obtenida de la biomasa, tiene complejas interacciones sociales y ambientales, incluyendo el efecto benéfico sobre el cambio climático, la producción de biomasa y el uso de la tierra. La biomasa es básicamente energía solar almacenada por las plantas mediante el proceso de fotosíntesis, en el cual se captura dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua ($\text{H}_2\text{O}_{(v)}$) que son convertidos en glucosa y posteriormente a almidones, celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otros. La biomasa, por lo tanto, cubre una amplia gama de materiales orgánicos producidos a partir de plantas y animales la cual se puede recoger, almacenar y utilizar como bioenergía útil. Los productos de biomasa más importantes como medios energéticos son los residuos de los cultivos agrícolas, los de los procesos forestales, los residuos del procesamiento de la madera, desechos de animales, incluidos los residuos humanos, residuos sólidos urbanos (RSU), desechos de procesamiento de alimentos, los cultivos realizados exclusivamente para su aprovechamiento energético y los bosques de corta rotación. Al utilizar la biomasa como combustible en cualquiera de sus formas sólida, líquida o gaseosa, se emite CO_2 , $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ y se libera la energía química almacenada para su aprovechamiento, en especial, como energía térmica y eléctrica. Dado que el balance de CO_2 liberado a la atmósfera por la biomasa durante su combustión es equivalente al secuestrado por la planta durante su ciclo de crecimiento, el balance de las emisiones es neutro y por lo tanto es una ER sostenible.

La biomasa, desde el punto de vista energético, se utiliza comúnmente en las plantas de generación o en las de producción combinada de calor y energía (CHP, por sus siglas en inglés *Combined Heat and Power*) ya sea como combustibles gaseosos (normalmente a escalas de 10 kW-5 MW) o como combustible sólido hasta varios cientos de MW, también se utiliza como materia prima en la producción de biocombustibles líquidos o gaseosos en el transporte (Ver Figura 1).

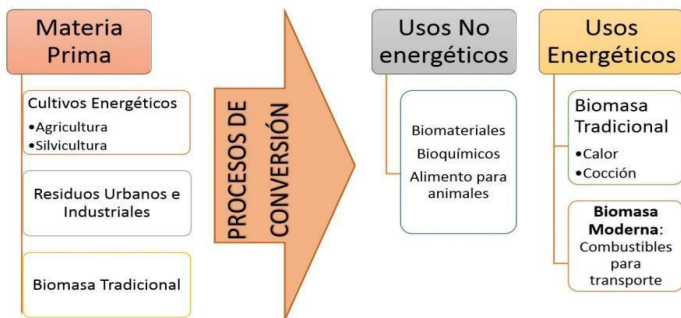


Figura 1. Procesos De Conversión De Biomasa A Energía. (Fuente: Rincón Martínez & Silva Lora, 2015)

La bioenergía es la única ER que se puede almacenar y transformar químicamente para reemplazar el petróleo y sus derivados; y es energía firme que se puede gestionar sin depender de factores externos como días soleados o presencia de viento. Del total de la energía primaria utilizada en el 2018 el 13.8% corresponde a ER, especialmente hidroelectricidad, eólica, solar, mareomotriz y bioenergía. La bioenergía tiene un mercado en crecimiento en los países industrializados especialmente los ubicados en Europa del Norte para la generación con biomasa. (World Bioenergy Association, 2020)

El uso del carbón y del petróleo como combustibles se ha incrementado exponencialmente liberando CO₂ al ambiente, el cual es la principal causa del calentamiento global. La utilización masiva de la energía en los hogares, sistemas de producción, transporte, entre otros, ha mejorado el estándar de vida de los habitantes en países desarrollados y en menor escala en aquellos en vía de desarrollo, los cuales, en forma indirecta, han establecido metas de consumo imposibles de alcanzar debido a la falta de reservas de recursos fósiles y a los problemas causados por los GEI. Debido a lo anterior, se han creado diferentes programas para disminuir la dependencia en los recursos fósiles y utilizar mayor cantidad de ER (Morris, 2021). El incremento se ha mantenido prácticamente constante hasta el 2018 (ver Figura 2).

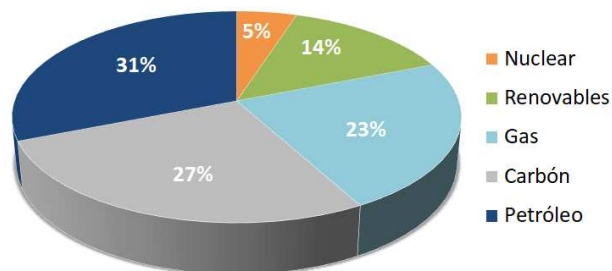


Figura 2. Suministro total de energía primaria a nivel mundial en 2018 con 598 EJ de energía total. (Fuente: World Bioenergy Association, 2020)

La biomasa tradicional se utiliza principalmente para cocción de alimentos y calefacción en zonas rurales de los países en desarrollo; esta representa aproximadamente el 8.5% del total de energía final. Las fuentes de ER han sustituido gradualmente a los combustibles fósiles convencionales en la generación de electricidad, calentamiento de agua, combustibles de transporte, provisión de energía en centros rurales alejados de la red energética, entre otros. (IRENA, 2020)

Los países del trópico poseen un elevado crecimiento de la biomasa lo que crea la oportunidad de establecer una industria de biocombustibles tanto sólidos como líquidos y gaseosos que repercutirán en altos beneficios sociales y ambientales a nivel mundial. El potencial técnico de biomasa para energía puede ser tan grande como 500 EJ/año, pero el potencial aprovechable por la humanidad es menor. La

demanda global de biomasa con fines energéticos se estima en 53 EJ (1.265MMtoe - Millones de toneladas equivalentes de petróleo).

El uso de la biomasa como recurso energético, como sustituto de los combustibles fósiles puede presentar ventajas medioambientales, como:

- Reducción de las emisiones de azufre, CO, HC, NOX, material particulado y metano (CH₄) que conllevan a la disminución de GEI.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.

Dada la baja densidad energética de la biomasa, someterla previamente a procesos de densificación energética como (briqueteado, pelletizado y torrefactado) mejora su aprovechamiento. La torrefacción, es el proceso de transformación térmica de la biomasa a temperaturas menores a la de pirolisis que debido al secado y reacciones de condensación la transforma en un producto energéticamente mejorado que reduce los costos de transporte, almacenamiento y molienda. Las ventajas asociadas pueden compensar los costos de transformación, en el caso de grandes consumos que implican largas distancias de transporte y aplicaciones que requieren la pulverización fina de la biomasa.

A continuación, se presentan las principales ventajas de la BT así como la composición química promedio de la biomasa y BT:

- ☑ El producto final tiene bajo contenido de humedad y es hidrófobo; esto hace que se sea estable en el tiempo, no se pudra y se almacena fácilmente.
- ☑ La BT es un material friable y menos fibroso que la biomasa original, lo que reduce el trabajo en molienda, los costos totales de acondicionado y facilita su manejo.
- ☑ La mayor densidad del sólido torrefactado reduce costos de transporte.
- ☑ El material torrefactado tiene mejores propiedades como biocombustible para combustión y gasificación
- ☑ En comparación con el carbón mineral, la BT tiene un contenido de azufre despreciable y genera menos cenizas
- ☑ Es un tratamiento versátil aplicable para dar valor energético a materias orgánicas residuales de baja calidad.
- ☑ El material torrefactado tiene un mejor rendimiento en su transformación en electricidad.

Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la sustitución del carbón mineral por biomasa como co-combustible en calderas de generación térmica. El uso de la biomasa en las plantas de generación térmica con carbón exige la integración de la biomasa la cual se puede realizar en sistemas de combustión externos independientes o mezclas de biomasa-carbón en combustión conjunta. Para la co-combustión con carbón pulverizado se utiliza el proceso de secado y torrefactado de la biomasa que facilita su molienda junto con el carbón. En la Tabla 1 se muestran los cambios en la composición de biomasa luego de ser sometidas al proceso de torrefacción.

Tabla 1. Cambios en la composición de la biomasa como consecuencia del proceso de torrefacción.

Parámetro	Unidad	Astillas de madera	Astillas de madera torrefactada
Volátiles	% bs	85.1	79.1
Humedad	%bh	10	0
C	% bs	51.7	55.3
H	% bs	6.3	5.9
O	% bs	41.9	38.7
N	% bs	0.1	0.1
S	% bs	0	0
Cenizas	% bs	0.3	0.3
PCI	MJ/kg	18.9	20.4
Hemicelulosa	% bs	15	7
Celulosa	% bs	50	38.4
Lignina	% bs	28.3	49.8

bs : Base seca libre de cenizas

2. Desarrollo

Se evaluó la integración de los residuos forestales generados por podas preventivas que buscan evitar daños en la infraestructura de transporte eléctrico en la ciudad de Bogotá y en sus alrededores. Estos residuos causan problemas de recolección, transporte, almacenamiento y contaminación ambiental. Las actividades realizadas en el desarrollo fueron: Recolección de la biomasa, caracterización, torrefactado, molienda e integración con finos de carbón mineral molido utilizado en la planta térmica Martín del Corral, la co-combustión en planta piloto y pre-evaluación económica.

2.1 Recolección de biomasa

Inicialmente se realizó la selección de especies arbóreas por medio de la revisión de informes de volcamientos de árboles en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y la Secretaría de Ambiente del Distrito Capital de Bogotá (SDA) entre los años 2007 y 2013 (CODENSA 2013) y se priorizaron de acuerdo al mayor número de volcamientos como las especies más representativas: Pino Ciprés (*Cupressus lusitánica*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Acacia (*Acacia*

dealbata) y Pino pátula (*Pinus patula*). Se realizó una reducción de tamaño de partícula in situ con el fin de facilitar su transporte; se utilizaron tambores plásticos de 55 galones clasificándolos en ramas y material leñoso.

Las muestras se sometieron a un secado al ambiente monitoreando su peso (por duplicado) hasta llevarlo a humedad de equilibrio. Para este secado la biomasa fue extendida en bandejas de aluminio durante cinco días a temperatura y humedad ambiente (ver Figura 3). Durante la molienda de las muestras se encontró que la reducción de tamaño se ve favorecida por la pérdida de humedad, adicional a lo anterior y observando las curvas de secado se encuentra que, a las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio, se alcanza la humedad de equilibrio a las 120 horas de secado.

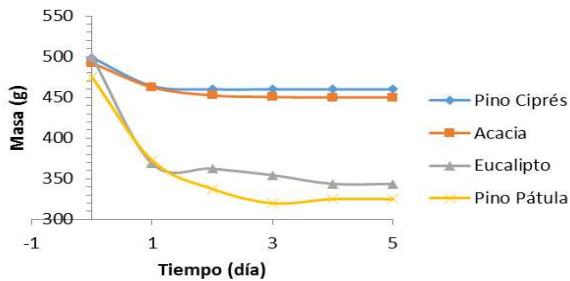


Figura 3. Curvas de secado para las diferentes biomásas (Elaboración propia)

2.2 Caracterización de biomasa

Los resultados de la caracterización física y energética de la biomasa y el carbón utilizados que incluye el análisis de Poder Calorífico superior e inferior (PCS y PCI), determinación del contenido de humedad, cenizas y materia volátil (análisis próximo del carbón y la biomasa) se presentan en la Tabla 2 y Tabla 3. Los métodos analíticos seguidos fueron ASTM 5865 para poder calorífico; ASTM 3175 e ISO 562 para materia volátil; ASTM D3174 e ISO 1171 para cenizas; y ASTM D-3172 para carbono fijo.

Tabla 2. Caracterización de las biomásas crudas evaluadas.

Características	Pino Ciprés (<i>Cupressus lusitánica</i>)	Acacia (<i>Acacia dealbata</i>)	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	Pino Pátula (<i>Pinus patula</i>)
Densidad aparente (kg/m ³)	549	499	520	164
Humedad (%)	44.5	9.7	17.8	9.36
Materia Volátil (%)	76.7	81.6	79.3	72.57
Carbono fijo (%)	22.9	8.1	22.6	27.17
Cenizas (%)	0.19	0.57	0.34	0.26
PCI b.s. (MJ/kg)	16.950	16.238	14.411	19.154

Tabla 3. Caracterización del carbón ROM como se recibe, en base seca.

Análisis	Unidad	Valor
Carbono fijo	%	57.0
Ceniza total	%	15.0
Ceniza intrínseca	%	6.5
Materia volátil	%	28.0
S orgánico	%	0.50
S pirítico + sulfatos	%	0.25
H total	%	3.0
C	%	78.0
H	%	4.82
N	%	1.65
S	%	0.75
O	%	4.10

3. Resultados y Discusión

3.1 Torrefacción a nivel laboratorio

Con el fin de determinar los tiempos y temperaturas de torrefacción a nivel de laboratorio, para las distintas especies arbóreas y tipo de residuos, se realizaron ensayos en estufa y en horno con retorta vertical, evaluando especie. En los primeros ensayos se buscó torrefactar ramas de las muestras de Pino Ciprés (*Cupressus lusitánica*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y Acacia (*Acacia dealbata*) en horno, a una temperatura de 300°C por una hora; a estas condiciones las muestras de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y Acacia (*Acacia dealbata*) se carbonizaron (Ver Figura 4c).



Figura 4. Diferencia entre biomasa torrefactada y carbonizada. A) Muestra de Acacia (*Acacia dealbata*) (ramas) torrefactada en horno A 230°C. B) Muestra de Pino Ciprés (*Cupressus lusitanica*) Torrefactada en estufa a 150°C. C) Muestra de *Acacia Dealbata* torrefactada a 300°C. (Fuente: elaboración propia. Instalaciones de Tecsol, 2015.)

Durante el proceso de torrefacción se busca que la biomasa torrada tenga un color café "tostado". Cuando se evidencia un color café oscuro o negro la biomasa se carbonizó lo que indica pirólisis; si la biomasa posee un color café claro indica que la

biomasa aun está cruda y se debe aumentar la temperatura o prolongar el tiempo de residencia. En la Figura 4 A y B se muestra biomasa torrefactada correctamente, mientras que en la C se muestra biomasa carbonizada.

Con el precedente de la carbonización de las muestras a 300°C y los resultados hallados en los ensayos en estufa se optó por disminuir la temperatura de torrefacción a rangos entre los 140 y 170°C para ramas pequeñas, y 230°C a 270°C para ramas de mayor tamaño. Por consiguiente en el caso de las ramas, se trabajó a una temperatura de 230°C con un tiempo de residencia de una hora, (Figura 4 A).

En la Tabla 4 se muestran los resultados de masa antes y después del proceso de torrefacción de las biomásas.

Tabla 4. Resultados de torrefacción de las muestras

Especie	Equipo	Temperatura de torrefacción (°C)	Tiempo residencia (min)	Masa Inicial (g)	Masa final (g)	Diferencia en masa (g)
Acacia	Estufa	170	900	100	93	8
Acacia	Horno	270	60	103	71	32
Acacia	Horno	300	30	110	70	40
Acacia	Horno	350	120	99	39	60
Eucalipto	Estufa	140	360	101	72	29
Eucalipto	Estufa	170	900	100	39	61
Eucalipto	Horno	30	NA	101	54	47
Eucalipto	Horno	250	NA	100	33	67
Pino	Estufa	140	360	100	90	10
Ciprés						
Pino	Horno	230	50	99	83	16
Ciprés						

Con los resultados obtenidos de los ensayos de secado y torrefacción realizados en laboratorio, se procede a realizar los ensayos a nivel de planta piloto.

3.2 Ensayos en planta piloto

Los ensayos de planta piloto se realizaron en las instalaciones de TECSOL. Inicialmente la biomasa se sometió a un proceso de secado al ambiente, luego a un proceso de torrefacción y finalmente se sometió al proceso de co-combustión con carbón.

- **Secado**

El material de podas recolectado se llevó a la planta piloto y se sometió a secado al ambiente en el patio. Se determinó que la humedad de equilibrio se alcanza a los 6 días de secado.

- **Planta piloto de torrefacción**

Horno de torrefacción: horno rotatorio enchaquetado de 7.16 m de largo inclinado 50cm respecto a su base y un diámetro interno de 60cm. Posee un motor eléctrico de 4 KW y un quemador de gas natural responsable del calentamiento (ver Figura 5).



Figura 5. Horno de torrefacción. (Fuente: propia, instalaciones de Tecsol, 2015.)

Molino de discos y molino de martillos: El molino de discos tiene con un motor de 8 HP capaz de pulverizar 2 toneladas de BT. También se utilizó molino de martillos empleado para la reducción de tamaño inicial, cuenta con un motor de 8 HP y es capaz de procesar 1 tonelada de biomasa seca o torrefactada. (Ver Figura 6).



A .

B .

Figura 6. Molinos. A) Molino de martillos. B) Molino de discos. (Fuente: propia, instalaciones de Tecsol, 2015.)

- **Resultados de la torrefacción**

Los ensayos en planta piloto se realizaron considerando los resultados obtenidos a nivel laboratorio. De acuerdo al material cargado la temperatura varió entre 170-250°C. Para la poda rica en ramas pequeñas se utilizó 170°C mientras que cuando la carga es rica en madera se trabajó entre los 200 y 250°C dependiendo del grosor del chip. En todos los casos se utilizó un tiempo de residencia de 30 minutos. Las Figura 7 y la Figura 8 muestran los resultados del procedimiento.



Figura 7. Muestras de podas secadas al ambiente alimentadas manualmente al horno (Fuente: propia, instalaciones de Tecsol, 2015.)



Figura 8. Producto torrefactado saliendo del horno (Fuente: propia, instalaciones de Tecsol, 2015.)

- **Planta piloto de combustión**

La planta piloto de combustión es una planta capaz de quemar combustibles sólidos pulverizados como biomasa y carbón mineral. Consta de las siguientes partes: sis-

tema de combustión, sistema de enfriamiento, cenicero, sedimentadores, extractor de gases e hidrociclón y chimenea (ver Figura 9).

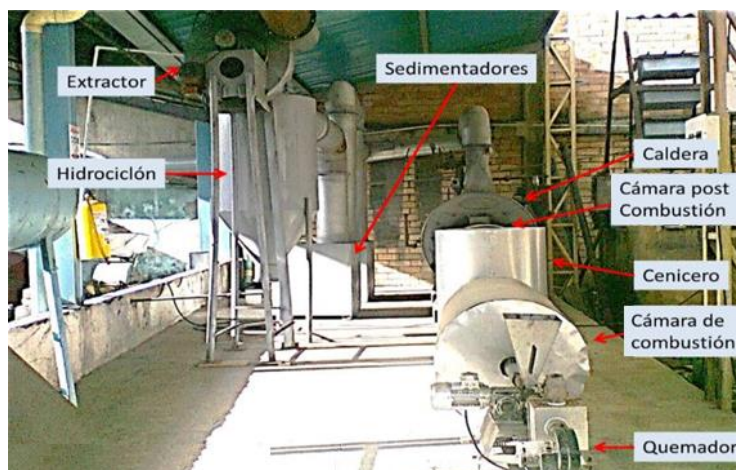


Figura 9. Planta piloto de combustión (Fuente: propia, instalaciones de Tecsol, 2015.)

- **Resultado de la combustión y la co-combustión de biomasa con carbón mineral**

Se realizaron ensayos de combustión de biomasa y co-combustión de biomasa con carbón empleando mezclas de 80% de carbón – 20% de biomasa (mezcla A) y 80% de biomasa y 20% de carbón (mezcla B). Se encontró que durante la combustión de la mezcla A se observan partículas incandescentes que son reflejo de inquemados del carbón. Al quemar la mezcla B se observó una llama limpia sin partículas incandescentes, debido a la reducción de inquemados.

Se realizaron formulaciones con carbón mineral y biomasa al 0%, 10%, 20% y 30% de biomasa. Se tomaron datos de temperatura del hogar de los ensayos de co-combustión entre 600°C y 900°C; los resultados se muestran en la Figura 10. Se obtuvo una correlación mayor a 0.98 para todos los casos, por lo cual no se requieren modificaciones apreciables en la planta de generación.

Se observó que la temperatura final de cada uno de los ensayos aumenta a medida que la cantidad de biomasa disminuye, con un máximo para la formulación en la cual no se tiene BT.

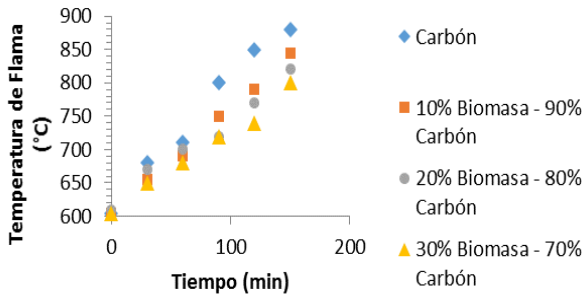


Figura 10. Comportamiento de la combustión de la biomasa torrefactada (Fuente: elaboración propia).

3.3 Evaluación financiera

Tomando en cuenta la cantidad de residuos disponibles, 30 t/d, se establece el tamaño de planta y costos de la misma. Los costos de inversión y el precio de venta de la biomasa procesada se estiman para obtener un Valor Presente Neto (VPN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la Tasa interna de oportunidad (TIO) real.

Para esta evaluación se tienen las siguientes premisas:

- Actualmente se paga por el servicio de poda, chipeado y disposición de la biomasa residual de las podas, por lo que esto no se toma en cuenta en la estructura de costos.
- El costo de la biomasa en planta es de COP\$45 000 por tonelada, calculado con el precio del transporte.
- El cálculo se hace en pesos constantes.
- Como tasa de interés se toma el 10%.
- El proyecto se evalúa en un horizonte de 10 años.
- El proyecto se financia con un préstamo bancario del 70% de la inversión.
- Para el periodo de repago se toma como utilidad la diferencia de precios, en términos de energía, de COP \$145 000 \$/t de carbón con un poder calorífico de 6 800 kcal/kg.

Los resultados de la evaluación financiera fueron:

Planta de Torrefactado. La planta tiene una capacidad de procesar 30 t/d de biomasa cruda, y como equipos básicos se tienen:

- Horno de torrefacción
- Molino pulverizador
- Complementarios

La Tabla 5 muestra el flujo de fondos financiero de plantas de torrefacción de BR 30 t/día.

Tabla 5. Flujo de fondos financiero plantas de torrefacción de biomasa residual 30 t/día

FLUJO DE FONDOS FINANCIERO		
Residuos de podas (t/d)		30
Capacidad de la Planta (t/año)		9 000
Precio venta Torrefactado (COP/kg)		93
Interés bancario real		10%
INVERSIONES		
PLANTA Y EQUIPO		
Horno torrefacción	\$	110 000 000
molino pulverizador	\$	85 000 000
Complementarios	\$	70 000 000
TOTAL PLANTA Y EQUIPO	\$	265 000 000
TERRENOS		
Terrenos	\$	100 000 000
TOTAL TERRENOS	\$	100 000 000
INSTALACIONES		
Instalaciones	\$	150 000 000
TOAL INSTALACIONES	\$	150 000 000
COSTOS DE OPERACIÓN		
Biomasa (COP/t)	\$	45 000
Mano de obra (9 operarios) (COP/MES)	\$	9 000 000
Dirección Técnica (COP/MES)	\$	5 000 000
Costo de Administración (COP/año) - 0,15%	\$	125 550 000
Otros costos (COP/año) - 0.05%	\$	41 850 000
TOTAL COSTOS DE OPERACIÓN	\$	181 445 000

Para una planta procesadora de 30 toneladas/día de biomasa residual de podas bajo torrefacción se tiene que el torrefactado tiene un valor de 93 \$/kg con una VPN de COP\$20 078 252, una TIR de 23% y una inversión COP\$ 515 000 000.

3.4 Reducción de emisiones de CO₂

Para establecer la reducción de emisiones de CO₂ se toma en cuenta el potencial energético de la biomasa y se establece a cuanto carbón de uso actual equivale, y con el factor de emisión del carbón se calcula la reducción equivalente de emisiones.

- Biomasa disponible = 30 t/d = 9 000 t/año
- Poder calorífico de la BT = 4 800 kcal/kg
- Energía disponible en la BR = 144 000 000 kcal/d
- Poder calorífico del carbón = 6 800 kcal/kg
- Carbón equivalente a la biomasa (energéticamente) = 21 176.5 kg/d = 21.18 t/d

• **Cálculo del factor de emisiones del carbón**

A partir del contenido de carbono en el carbón (ver Tabla 3) se asume que durante la combustión todo se emite en forma de CO₂. Teniendo en cuenta que el carbón tiene un 78% de carbono, la combustión de 1 kg de carbón emite 2.86 kg de CO₂, así la sustitución de 21.18 t carbón/d por biomasa, reduce las emisiones de CO₂ en 60.6 t CO₂/d. Considerando un factor de operación de planta del 80% esta reducción corresponde a 17 688 t CO₂/año, que al precio de bonos de carbono de COP\$15 000/t, el ingreso adicional por este concepto es de COP\$265 320 000.

4. Conclusiones del estudio

- La torrefacción es una tecnología sencilla en cuanto a infraestructura, pero bastante exigente en cuanto a control de los parámetros de operación (tiempo de residencia y temperatura) pues una desviación en ellos cambia las propiedades del producto de manera sensible.
- El material torrefactado se deja pulverizar fácilmente y se integra muy bien con carbón pulverizado para su co-combustión.
- Se puede sustituir hasta un 20% de carbón por biomasa torrefactada, sin cambios importantes en el comportamiento durante la co-combustión, permitiendo el uso de las instalaciones actuales sin requerir modificaciones.
- La Kilocaloría de origen de biomasa residual torrefactada tiene costos competitivos frente al carbón mineral utilizado.

Referencias

- IRENA. (2020). Renewable energy and climate pledges five years after the Paris agreement.
- Morris, C. (01 de Enero de 2021). Institutional Investors Are Running Away From Big Oil, & Towards The "Safe Haven" Of Clean Tech.
- Rincón Martínez, J. M., & Silva Lora, E. E. (2015). Bionergía: Fuentes , Conversión y sustentabilidad. Bogotá - Colombia.
- World Bioenergy Association. (2020). Global Bioenergy Statistics 2020. Obtenido de https://worldbioenergy.org/uploads/201210_WBA_GBS_2020.pdf



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso XI, 2021: 229-246
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO XI. Diversificación de la producción agro industrial del Noroeste Argentino a través de la producción de pellets de residuos de cosecha de caña de azúcar

Guillermo Martínez Pulido¹, Gabriela Nuño^{1,2}, Yamile Perdiguero Samaja¹, Marcos Gabriel Risso¹, Florencia Peralta¹, Martín Rearte¹

¹-Departamento de Energías Renovables NOA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Miguel de Tucumán, Tucumán, CP4000, Argentina

²-PROIMI-CONICET, San Miguel de Tucumán, Tucumán, CP4000, Argentina

Resumen: Argentina cuenta con una importante producción de caña de azúcar particularmente en la región Noroeste, la cual ha impulsado la economía local en las últimas décadas, principalmente a través de la producción de etanol para el corte con las naftas según Ley 26.093/06. Este impulso ha generado grandes asimetrías en la cadena de valor concentrando la riqueza hacia el extremo industrial relegando cada vez más a los pequeños productores. El ensayo llevado adelante por especialistas de INTI y coordinado con diferentes actores de la cadena agroindustrial de producción de azúcar, contempló la parametrización de la recolección de los residuos agrícolas de caña de azúcar (RAC), la logística hacia la planta de pelletizado, el pretratamiento, el conformado del pellet y su caracterización preliminar, para lograr validar la tecnología a escala industrial de pelletizado como alternativa al manejo actual de esta biomasa residual, que además genera un pasivo ambiental para la región muy importante. Los resultados fueron positivos logrando un pellet de características adecuadas para aplicaciones térmicas. Este estudio plantea por un lado una alternativa tecnológica viable para disminuir las asimetrías del sector mejorando las condiciones de los minifundistas y cooperativas dueñas del recurso, y por otro una base para el desarrollo industrial de plataformas de biorrefinerías a escala piloto y el análisis de procesos involucrados en la generación de biocombustibles sólidos a partir de residuos agroindustriales de relevancia regional o nacional que pueden generar grandes impactos en el sector energético a futuro.

*Correspondencia: Martín Rearte. E-mail: mrearte@inti.gov.ar

1. Introducción

A nivel mundial, Argentina es un productor importante de azúcar y alcohol, donde las actividades sucro-alcoholeras se concentran principalmente en el noroeste argentino (NOA), región que incluye a las provincias de Tucumán, Salta y Jujuy. Esta industria y las actividades asociadas al cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) así como también la matriz energética que surge de esta, representan la actividad económica más importante en la región con más 365.000 hectáreas implantadas, de las cuales se derivan y procesan por año alrededor de 20 millones de toneladas de caña de azúcar.

La caña de azúcar se planta durante todo el año y las actividades fabriles se realizan desde mayo hasta mediados de noviembre. La introducción de bioetanol para el corte con las naftas ha cambiado el paradigma de la industria y de los productores al reasignar el excedente y aumentar el área de siembra para satisfacer la nueva demanda, mejorando así la rentabilidad y la previsibilidad. Sin duda esta actividad tiene una fuerte influencia socioeconómica en la región del NOA, según el Centro Azucarero Argentino (2017), se generan 54.000 puestos de trabajo directos y 140.000 indirectos. Solamente en Tucumán la industria sucro-alcoholera aporta el 10% del Producto Bruto Provincial y el 6% en Jujuy, segunda en el volumen de producción.

El área cañera cosechable en Tucumán, mostró una tendencia creciente hasta la zafra 2013, presentando una caída pronunciada en el año 2014. Sin embargo, a partir del 2015 y hasta el 2020 se constató una tendencia creciente en relación al ciclo precedente en el orden del 0,58% (1.590 ha) estimando una superficie neta cosechable con caña de azúcar para la zafra 2020 de 276.880 ha. (Fandos, et al. 2020).

La zafra 2020 involucra en total 20 ingenios azucareros (15 en Tucumán, 2 en Salta y 3 en Jujuy), 16 destilerías de alcohol, 12 deshidratadoras de alcohol y 8.100 productores cañeros, de los cuales casi 6.000 pertenecen a la provincia de Tucumán. En cuanto a la producción se generan entre 2,2 a 2,5 millones de toneladas de azúcar, 690 millones de litros de bioetanol (utilizado mayoritariamente en el Programa Nacional de Biocombustibles y un porcentaje menor direccionado para el abastecimiento de sanitizantes para combatir el virus SARS-CoV-2) y 100 MW/h calor y energía a partir de procesos de co-generación. El consumo interno de azúcar se sitúa entre 1,6 y 1,7 millones de toneladas y para exportación se destina entre 0,5 a 0,9 millones de toneladas anuales (Informes de cadena de valor, Subsecretaría de Programación Microeconómica, 2018/3). Mientras las exportaciones no sean atractivas, el mercado interno puede considerarse estable. En este esquema los pequeños productores están agrupados en cooperativas, la mayoría exclusivamente cañeras con una baja diversificación productiva la cual básicamente se basa en la producción de miel de caña y proyectos vinculados a la cría de animales.

En cuanto a los residuos originados a partir de las actividades cañeras, es decir la malhoja o RAC que queda en el suelo luego de la cosecha, el uso de estos en la actualidad es muy bajo en relación a la cantidad de este recurso generado y teóricamente disponible para su valorización e industrialización. El uso de éstos está dificultado mayormente por sus altos costos de recolección, transporte y pretratamiento, básicamente por tratarse de una biomasa de baja densidad. Particularmente en el NOA la prohibición y eliminación paulatina de la quema del cañaveral y el avance creciente de la cosecha en verde, han dado lugar a la posibilidad de disponer de este material (Feijoo *et al.*, 2015), el cual presenta un alto potencial como fuente de energía por su disponibilidad teórica y sus características físico-químicas similares a las del bagazo (WISDOM, 2009).

Muchos estudios se han enfocado en la utilización de este material para la generación de energía (Maués, 2008; Devi *et al.*, 2020; Sampaio *et al.*, 2019; Ripoli *et al.*, 2020; Janke *et al.*, 2015; Vats *et al.*, 2019). Todos estos desarrollos se han visto limitados por el alto tenor de cenizas del RAC (alrededor del 12% dependiendo del método de cosecha), por lo cual se tiende al aprovechamiento con una mistura de otros materiales biomásicos como el propio bagazo (Feijoo *et al.*, 2015).

La utilización de los RAC para la producción de pellet como biocombustibles sólidos es una alternativa interesante para utilizar en las calderas del propio ingenio en conjunto con el bagazo (Muñoz, 2017). Esto último tiene el potencial de crecer como un negocio independiente para suplir combustibles fósiles en la región, siendo una línea estratégica de desarrollo impulsada por el INTI y por otras instituciones científicas de la región NOA y proyectos de fomento como el PROBIOMASA (FAO, 2009).

Como una aplicación específica, en el marco de este trabajo se llevó a cabo el primer ensayo a escala industrial en Argentina de conformado de pellets con RAC, con maquinaria disponible y existente en el mercado. El biocombustible esperado tiene como objetivo ser una alternativa viable para el reemplazo del gas natural y diversos quemadores y procesos térmicos e incluso para el precalentamiento de las calderas bagaceras en los ingenios reduciendo el costo de esta etapa.

El presente estudio propone a los RAC como una oportunidad para la implementación de tecnología preexistente para el pelletizado, la cual se encuentra consolidada en nuestro país para el sector alimenticio ganadero, lo que implica que serán necesarias modificaciones y adaptaciones para lograr un producto acorde a los estándares esperados en cuanto a biocombustibles sólidos, no obstante, se espera que dichas modificaciones sean viables y mayormente orientadas a la limpieza y el pretratamiento de la materia prima. Por otro lado, el trabajo permite también recopilar datos técnico-económicos necesarios para diseñar un modelo de aprovechamiento que represente una alternativa para mejorar la rentabilidad de la actividad del pequeño producto o cooperativa que los nuclea.

Este trabajo se enmarca en las actividades de investigación y desarrollo del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) llevado a cabo por el área dedicada a la

valorización de recursos biomásicos del Centro de INTI Tucumán en colaboración con el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) como parte de un programa de fortalecimiento institucional en la temática de bioenergía y biorrefinerías para el Noroeste Argentino.

Problemática socio económica

El sector muestra una necesidad de diversificar sus actividades productivas en función de la crisis que ha atravesado la actividad cañera en las últimas campañas. Los bajos precios, los descuentos que se les realizan y los rendimientos, que muchas veces son establecidos por los ingenios por debajo de los valores que los productores consideran razonables, han llevado a analizar fuentes alternativas de ingresos.

Por otro lado, las transformaciones en el proceso productivo, mediante la mecanización integral de la cosecha, ha dado como resultado una disminución del empleo en las últimas tres décadas. Se estima que cada cosechadora reemplaza a 150 trabajadores (Ministerio de Hacienda, 2018).

En cuanto a la posibilidad de comenzar proyectos no vinculados a la caña de azúcar, diferentes instituciones de soporte a la actividad cañera en provincias como Tucumán, expresan que han encontrado reticencia de sus asociados debido al arraigo histórico y el peso cultural de esta actividad en la provincia. Esto se ha constituido como una limitación a la posibilidad de desarrollo de proyectos alternativos (PROICSA, 2013).

Problemática ambiental

Los residuos o biomasas residuales derivados tanto de la cosecha como de la producción industrial de azúcar, papel y etanol actualmente no son aprovechados, o se aprovechan mínimamente, lo que conlleva a un problema ambiental.

Las asimetrías en cuanto a la accesibilidad a la tecnología hacen que la cosecha sea altamente tecnificada o rudimentaria en cuanto a la eliminación de la malloja del campo. De esta manera la cosecha puede llevarse a cabo mecánicamente con una cosechadora integral que separa y trocea la caña antes de la carga al volcador o de formas rudimentarias e incluso a mano.

El pequeño productor que no tiene acceso a la maquinaria moderna de cosecha, a veces debe quemar la caña en pie antes de la cosecha, siendo esta práctica muy riesgosa ya que durante años ha sido causante de focos de incendios de enormes proporciones y trae aparejados perjuicios para la sociedad (afecciones a la salud, contaminación ambiental, cortes de energía eléctrica, accidentes de tránsito, etc.).

Por otro lado, resulta evidente que la quema de caña o sus residuos de cosecha tienen un efecto negativo en la producción debido a que se desencadena un proceso de degradación del azúcar almacenado en el tallo de la caña. Si además se realiza la quema en seco de los RAC se elimina la barrera protectora que tiene el suelo para evitar la evaporación del agua de lluvia almacenada en él con marcado efecto negativo para el cultivo de caña en años con deficiencia hídrica.



Figura 1 - Quema de caña en pie en Tucumán. (Fuente: diario La Gaceta)

Cabe destacar que esta práctica se sigue realizando en la actualidad, aun cuando está totalmente prohibida realizarla en la provincia de Tucumán. Si bien la tendencia de estos años es la disminución gradual de la quema de la caña, en el 2020 se quemaron 111.250 ha (aproximadamente el 40% de la superficie plantada en la provincia) según los datos proporcionados por la Sección de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica de la Estación Agroindustrial Obispo Colombres. En cuanto a la cosecha mecanizada, la técnica es dejar la malloja como residuo agrícola para secarse en el campo y como aporte de materia orgánica o humedad al suelo. Desde el punto de vista energético, este residuo biomásico tiene alto potencial energético, pero debido al paradigma histórico de la cosecha de caña, donde gran parte de los productores argumentan que el rastrojo no aporta beneficios al suelo, es que la quema continua y no se ha desarrollado alguna alternativa viable de aprovechamiento como por ejemplo el uso como biocombustible en grandes calderas para la co-combustión con el bagazo de la caña. (Portocarrero *et al.*, 2017).

Problemática técnica

Como referencia inicial los RAC actualmente se recolectan con dos tipos de máquinas, una denominada megaenfardadora y otra rotoenfardadora las cuales ya han sido sujetas a estudios comparativos para dilucidar sus costes y rendimientos. Este trabajo está enfocado al proceso de transformación industrial pero la recolección en sí misma es un campo de desarrollo mecánico aún con mucho potencial.

En cuanto al acondicionamiento e integración en las técnicas de cultivo, la limpieza y pretratamiento para lograr las condiciones necesarias para el conformado de pellets para uso energético, todavía representa un reto. Algunos de estos factores se desarrollaron en este estudio y otros se analizan para futuros trabajos de mejora para esta aplicación dentro del campo de la bioenergía.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es recopilar las directrices técnicas y metodológicas necesarias para diseñar a corto plazo un modelo de negocio rentable basado en el desarrollo de un agro pellet o pellet energético a partir de residuos agrícolas, un nuevo biocombustible para aplicaciones industriales de alcance regional que pueda cumplir estándares de calidad del mercado, ya sea para uso en aplicaciones térmicas industriales o residenciales. En este trabajo nos enfocamos especialmente en los RAC que presentan un alto potencial energético con alta producción en el noroeste argentino.

Como objetivos específicos se plantean:

- a) Determinar las características fisicoquímicas del RAC, para establecer el potencial que tiene como biocombustible, y para comprender su comportamiento durante el proceso de compactación y densificación y durante la conversión termoquímica.
- b) Elaborar agro pellets a partir del RAC caracterizado y realizar ensayos de caracterización a los pellets obtenidos para asegurar la eficacia y calidad del producto.

3. Metodología

3.1. Recolección y transporte

Para viabilizar la recolección y acopio de RAC se trabajó con un productor cañero quien proporcionó la materia prima. La elaboración del RAC se realizó utilizando un tractor, una hileradora y una mega-enfardadora. En cuanto a la carga y el transporte de los fardos, el productor articuló con el proveedor del servicio de recolección para que se transportaran 2 rollos de RAC desde Tucumán hasta la ciudad de Rafaela, Santa Fe donde está localizada la empresa en la cual se realizaron las pruebas.



Figura 2 – Preparación de los rollos para ser transportados a la planta de pelletizado (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.2. Recepción y acondicionamiento de la biomasa residual

Los fardos fueron recepcionados y se tomaron muestras para analizarlas físicamente a través de ensayos de fotometría. En este ensayo, por medio de una inspección visual sobre una lámina con una grilla de cuadrícula mayor de 5 cm² y cuadrícula

menor de 1 cm²., se determina la uniformidad de la biomasa a través del estudio de su composición en relación al contenido de distintos materiales y al tamaño. El acondicionamiento se realizó a través de dos etapas. En una primera etapa se realizó una transformación o desmenuzado con una máquina desmenuzadora (Figura 3 a) accionada por toma de fuerza de tractor. A esto le siguió una segunda transformación o molienda con molino de martillo con motor 50 HP con malla de 7 mm (Figura 3b).



Figura 3.- Maquinaria para el acondicionamiento de tamaño de la biomasa. a) máquina desmenuzadora. b) Molino de martillo (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.3. Caracterización de la biomasa

La caracterización de los residuos de caña de azúcar, para la muestra M1, se basó en análisis de:

- Contenido de humedad (Hames *et al.*, 2008), se determinó por secado de muestra al aire. Método adecuado para la preparación de grandes cantidades (>20 g) de muestra recogida en campo, donde la humedad ambiental permite secar la muestra hasta un contenido en humedad por debajo del 10%. Las muestras de biomasa deben contener piezas de dimensiones menores de 5x5x0,6 cm. Los tallos y ramas pequeñas no deben tener un diámetro superior a 0.6 cm. El material se debe extender en una superficie adecuada, sin exceder los 15 cm de altura, dejándose secar al aire antes del análisis. Finalmente se debe voltear el material al menos una vez al día para asegurar un secado uniforme. Se considera que el material está seco cuando el contenido en humedad es menor de 10% y el cambio de peso es menor de 1% en 24 horas.
- Contenido de cloro y azufre se determinó por medio de técnicas según normas modificadas (ASTM E 776-87 modificada, ASTM D 3177-02 modificada, ISO 351, AS1038.6.1, AS1038.8.1). El %Cloruros: el extracto obtenido de la combustión de la muestra en bomba calorimétrica y se titula con nitrato de plata utilizando K₂Cr₂O₇ como indicador. Se determina el %cloruro por volumetría. El %Azufre: el extracto obtenido de la combustión de la muestra en bomba calorimétrica se hace reaccionar con BaCl₂, hasta formación de un precipitado de

BaSO₄, el cual se calcina. El peso del residuo es equivalente al azufre presente en la muestra.

- Poder calorífico superior (PCS) se determinó por combustión completa de 1 g de muestra seca en bomba calorimétrica automática IKA C5000, en método adiabático de acuerdo a normativa internacional (ASTM D5865, ISO 1928, AS1038.5.1).
- Contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cenizas, se tomó como referencia de la literatura (Reyes Montiel, 2003).
- Por otro lado, para las muestras M1, M2 y M3 (obtenidas en la etapa de acondicionamiento de la biomasa residual) se analizó:
- Densidad aparente (UNE-EN 15103), se determinó pesando un volumen determinado de muestra en vaso de precipitado de 1 L de capacidad total, y se determina la densidad aparente por cálculo. La determinación se efectúa en las condiciones de recepción de la muestra. El resultado se expresa en kg/m³ aparente.
- Contenido de humedad (ASTM D3173-03, ISO 11722, AS1038.3) por secado de muestra en estufa con tiro forzado de aire, a 105°C hasta peso constante.
- Tamaño de partícula a través de un ensayo de distribución granulométrica (UNE-EN 15149-1). Se realiza una clasificación de la muestra según el tamaño de partículas de la misma. Se utilizan tamices de apertura estandarizada, seleccionados de acuerdo a las características de la muestra.

3.4. Ensayo industrial de conformado de pellets de RAC

El proceso de pelletizado que consiste en la compactación de la biomasa de madera natural, mediante la aplicación de una gran presión con unos rodillos sobre una matriz perforada, a través de la cual se hace pasar el material. La operación de pelletizado se llevó a cabo en una prensa marca Giuliani (fig. 4a) con matriz anular de 6 mm de diámetro de extrusión (fig. 4b) y motor eléctrico de 75 HP. El INTI trabaja en el diseño mecánico de estos componentes críticos para el proceso de pelletizado dando soporte a las empresas del rubro.



Figura 4. a) Prensa Pelletizadora. b) matriz (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.5. Caracterización del biocombustible

Sobre los pellets ya elaborados se estudiaron distintos parámetros de calidad, basándose en la normativa europea EN14961-2 y la más reciente norma ISO 17225-5 para pellets de madera para usos térmicos (ISO 17225-5). Se determinó contenido de humedad que influye sobre el poder calorífico y sobre la eficiencia de la combustión, dimensiones que influyen sobre la velocidad de combustión, densidad aparente que influye de manera considerable sobre el almacenamiento, transporte y también sobre el comportamiento durante la combustión, y durabilidad que determina la resistencia de la estructura del pellet al estrés mecánico.

4. Resultados

4.1. Recolección y transporte

En esta etapa solamente se caracterizó el tipo de fardo por forma y dimensiones, ya que los costes de transporte y de servicio de enfardado (megaenfardado o enrollado) son valores conocidos en la actividad siendo hasta 3 veces más costoso que el servicio el cultivo de la caña misma (Paredes *et al.*, 2016).

4.2. Recepción y acondicionamiento de la biomasa residual

En la Figura 5a se puede observar el material en las condiciones en la que ingresó al laboratorio de biocombustibles de INTI, obtenido en el lugar de recolección antes de que se realizara el enfardado.

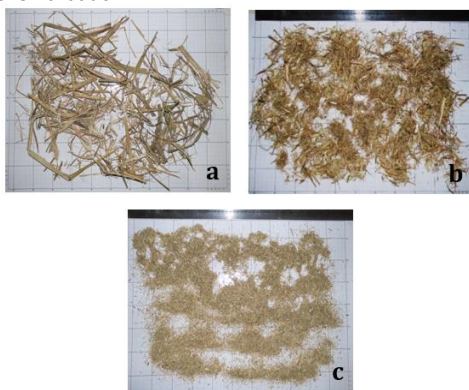


Figura 5. Fotometría. a) muestra M1, RAC sin enrollar. b) muestra M2 obtenida a partir de la maquina desmenuzadora. c) muestra M3 obtenida a partir de molino de martillo. Fotometría: Grilla de 50x50 mm de resolución 10mm. (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

La muestra presentó material más o menos uniforme en cuanto a composición, con un largo de fibra de 400 a 600mm, excediéndose esta medida a la medida necesaria para el ingreso a los sistemas de la maquinaria para pelletizado de acuerdo a las especificaciones del proveedor. El largo de fibra influye en los sistemas de transporte enredando las fibras en los componentes rotatorios sin mencionar que no podría ingresar ni fluir en la prensa pelletizadora. Por lo que se continuó con el correspondiente acondicionamiento de la biomasa a través de distintas etapas de molienda, observándose a través del ensayo de fotometría la obtención de tres muestras de distintos tamaños. Las muestras fueron designadas como M1 (muestra sin acondicionar), M2 y M3 (muestras acondicionadas).

En la primera etapa de acondicionamiento se obtuvo una biomasa M2 con tamaño de partícula de 50 a 120mm (Figura 5b). En la segunda de transformación se llegó a obtener una muestra M3 con un tamaño de partícula final de 2 a 15mm (Figura 5c).

4.3. Caracterización de la biomasa

El análisis de humedad, densidad aparente y distribución granulométrica (a cada una de las muestras que se obtuvieron en las etapas de acondicionamiento) se puede observar en la figura 6. La densidad aparente de la biomasa aumenta en la muestra M3, lo que facilita su manejo a granel y transporte.

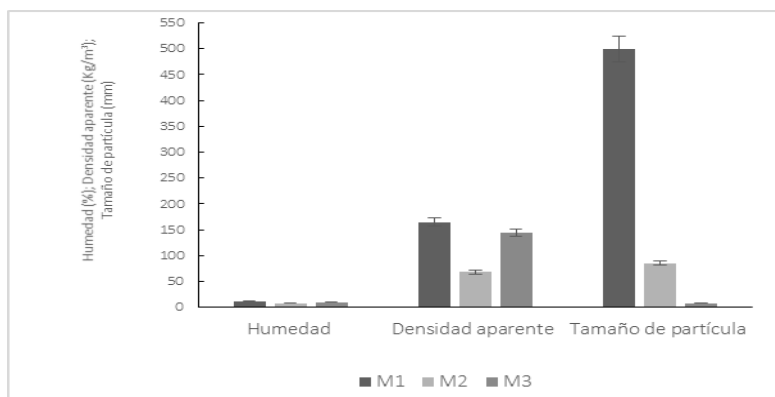


Figura 6. - Caracterización física de la biomasa residual

En la tabla 1 se puede observar la caracterización físico química realizada a la muestra M1. El contenido de C e H es proporcional al contenido energético de la biomasa en estudio, y está relacionado con la calidad de la biomasa y la cantidad de calor que puede liberar en un proceso de termo conversión, expresada a través del poder calorífico superior. Los resultados recopilados muestran que el contenido de C, H y O es similar a otras biomásas lignocelulósicas como el bagazo o la madera (De Palma

et al., 2019) con lo que se puede considerar al RAC una biomasa con buen potencial combustible donde el poder calorífico será muy similar al de otras biomásas lignocelulósicas.

Por otro lado, el contenido de N y S se presentan bajos y similares al de otras biomásas lignocelulósicas. Estos parámetros permiten conocer el potencial de contaminación que posee la biomasa ya que están relacionados con la emisión de contaminantes (óxidos de azufre y nitrógeno) durante el proceso termoquímico. En cuanto al contenido de N, también sirve de parámetro para clasificar a la biomasa en estudio, de esta manera y con el valor de referencia obtenido, se lo clasifica como combustible de N medio (0,4-1% en peso) según Sommersacher et al. (2012) El contenido de N en el RAC es atribuido a la presencia de N en las moléculas de clorofilas y en las proteínas de las hojas de la caña de azúcar. En cuanto a la ceniza, esta genera problemas de corrosión, aglomeración y deposición o incrustaciones en los sistemas de combustión. En los resultados se puede observar que el contenido de ceniza obtenido fue elevado debido a que los RAC contienen contaminantes del suelo por el sistema de recolección implementado. Sin embargo, existe la posibilidad de disminuir el contenido de contaminantes del suelo en los RAC realizando la recolección con maquinaria integral con modulo incorporado, donde se realiza una separación del despunte dejando solo la hoja en el suelo.

Tabla 1 - Caracterización química y fisicoquímica de la biomasa residual

Análisis	Valores	Técnica de medición
Poder calorífico (Kcal/Kg)	2300/2400	ASTM D5865, ISO 1928, AS1038.5.1
Carbono (%)	45.28 ± 0.20	(TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003
Hidrogeno (%)	5.55 ± 0.05	(TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003
Oxígeno (%)	45.61 ± 0.15	(TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003
Nitrógeno (%)	0.43 ± 0.03	(TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003
Azufre (%)	0.13 ± 0.02	ASTM E 776-87 modificada, ASTM D 3177-02 modificada, ISO 351, AS1038.6.1, AS1038.8.1
Cenizas (%)	9.5 ± 0.10	ASTM D7582-12 modificada ASTM D5142-02

Nota. El poder calorífico superior se determinó con un contenido de humedad en la biomasa del 15%. Los valores de CHON se toman de bibliografía para verificar en laboratorio.

4.4. Ensayo industrial de conformado de pellets de RAC

La pelletización es un proceso de compactación y densificación de material lignocelulósico de determinadas condiciones (granulometría y humedad menor del 12%) para obtener cilindros de diámetro entre 7 y 22 mm y de longitud entre 2,2 cm a 7.0 cm. La compactación facilita la manipulación y el almacenamiento por reducción de volumen, disminuye los costos de transporte y aumenta su valor energético por unidad de volumen (aumento de densidad energética).



Figura 7. - Pellet de RAC de caña de azúcar (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

Primero se acondicionó la materia prima en cuanto a granulometría, ya descrita en los pasos previos, y a humedad. Esta última realizada de forma natural en el campo sin gastos de energía extra para eliminar el exceso de agua que puede llegar a repelerse con el aglutinante (lignina) y generar rompimiento de la estructura del pellet, poca densificación y poca durabilidad en los pellets. Finalmente se llevó a cabo el proceso de compactación obteniéndose pellets (Figura 7) a los que se les realizó la correspondiente caracterización.

4.5. Caracterización del biocombustible

En general, todos los valores medios de los parámetros analizados se encuentran dentro de los requisitos de la normativa cumpliendo con los criterios de calidad para pellets clase A1 quedando algunos más específicos para futuras determinaciones (tabla 2).

Tabla 2 - Resumen de los parámetros de calidad del pellet, valores estándar y técnicas de medición

Variable	Valor obtenido	Valor Ref. Norma ISO 17225	Técnica de medición
Longitud promedio (mm)	12	$3,15 \geq L \geq 40$	Tumuluru et al., 2014
Diámetro (mm)	5.8	6 ± 1 u 8 ± 1	
Humedad (%)	9	≤ 10	ASTM D3173-03, ISO 11722, AS1038.3
Densidad (kg/m ³)	728	≥ 600	UNE-EN 15103 ISO 17828
Durabilidad mecánica (Peso-% a.r.)	95	$\geq 97,5$	ISO 17831-1
Finos, F (Peso-% a.r.)	-	< 1	ISO 18846

Nota: El producto terminado tiene las siguientes características de acuerdo al Procedimiento VRB-P-TPA02 de calidad de Pellet basado en la Normativa Europea EN14961-2. Se usó como referencia Pellets de Madera para Usos Térmicos (ISO 17225-5)

5. Discusión

Se debe tener en cuenta que este ensayo se realizó en varias etapas desde los estudios de recolección y pelletizado hasta las caracterizaciones modernas según las normas vigentes que fueron desarrollándose durante este período. En el año 2019 se aprobó y publicó en Argentina el primer juego de normas IRAM-ISO 17225 para clasificación de biomásas para uso energético en las que se consideran a los residuos agrícolas como potencial fuente de energía incluyendo los RAC.

Adicionalmente en los últimos años se logró modificar el método de cosecha, haciendo que la maquinaria agrícola sea capaz de discriminar la malloja en el momento de la cosecha de la caña, desagregando los RAC en un RAC residual y el despunte de caña de azúcar. De esta manera se abre la puerta a una mejora de la calidad del material o materia prima apta para la producción de pellet, referida al contenido de cenizas generado luego de la termoconversión.

En cuanto al proceso de secado, este no podría desarrollarse de forma natural debido a que el material se retiraría del campo, el control de humedad se debería hacer en planta o con sistemas híbridos de secado natural y forzado. A partir de los resultados obtenidos en este estudio se refleja la posibilidad de alcanzar una calidad para este futuro biocombustible similar a la calidad propuesta en los altos estándares de exportación.

Cabe destacar que este biocombustible puede ser un hito disruptivo para el uso y la eficiencia de la energía en los ingenios azucareros, diversificando el negocio. Mientras que para el pequeño productor puede significar una mejora de la rentabilidad de la tierra y la posibilidad de industrializar su actividad a través de emprendimientos cooperativos capaces de operar plantas de pelletizado de menor potencia para los mercados locales.

Queda pendiente la integración de la cadena de costos desde la recolección hasta la producción final del pellet integrando los parámetros de valor agregado que otorga una certificación. En este caso, el INTI está desarrollando certificaciones para el mercado bioenergético y las nuevas tecnologías emergentes en la región para revalorizar este residuo biomásico.

Finalmente se puede resaltar que el objetivo de validar la tecnología existente y su adaptabilidad para este biocombustible se logró satisfactoriamente y presentó interés en otras regiones productoras de caña de azúcar como Cuba y Brasil y en eventos asociados a la industria del sector como el "Congreso Mundial de Caña de Azúcar ISSCT 2019" e incluso en instituciones internacionales dedicadas a los biocombustibles de 2G como el CENER en España.

6. Conclusiones del estudio

A pesar de que existe una gran cantidad de subproductos agrícolas en Argentina, la producción de pellets con biomasa residual agrícola se desarrolla lentamente, siendo una razón de esto la diferencia de calidad entre los pellets de madera y los pellets agrícolas. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la calidad obtenida fue satisfactoria para el pellet de RAC si se compara con las características definidas por la norma europea. Sin embargo, habría que estudiar otros parámetros de calidad como contenido de cenizas, contenido de azufre y fusibilidad para obtener una idea más amplia sobre la calidad y la utilidad en cuanto a transformación energética de los pellets producidos. Estos datos podrían sugerir mayor atención en proceso de fabricación y selección de materia prima.

Desde el punto de vista industrial, el proceso mostró una alta adaptabilidad para trabajar con este material sin mayores dificultades considerando que se trabajó por lotes, en caso de una producción continua serán necesarias adaptaciones para poder asegurar una granulometría adecuada para la alimentación y el conformado en la prensa pelletizadora. Adicionalmente un factor a controlar para mejorar la calidad es la humedad de ingreso de los RAC a los sistemas de molienda, antes del pelletizado y finalmente después del conformado.

Otro factor importante a tener en cuenta en la calidad final es el cuidado de la estructura del material desde la etapa de conformado hasta su enfriamiento. Esta última característica no es tan importante en la producción de pellets para alimentos, no así para los productos bioenergéticos que deben preservar una mayor uniformidad para poder ser dosificados en los quemadores industriales o más aún en sistemas más exigentes como en aparatos de calefacción doméstica.

Este trabajo permite concluir que el RAC presenta un alto potencial para la elaboración de pellets energéticos, susceptibles de ser aprovechados en la producción de energías renovables. Así, se establece una base sólida que permitirá avanzar en materia de estrategias bioenergéticas para promover la viabilidad de proyectos que utilicen energía derivada de biomasa.

7. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

En Argentina, la distribución de energía eléctrica, principalmente en áreas rurales, no es uniforme, generando una brecha de desarrollo para comunidades apartadas de la red eléctrica. La energía eléctrica para iluminación y otros usos en zonas de difícil acceso, se realiza mediante grupos electrógenos a gasolina o diésel. El auto-abastecimiento con biocombustibles de producción descentralizada en pequeñas plantas autónomas a partir de residuos biomásicos procedentes de la economía regional, se muestran entonces como una oportunidad para la generación de energía eléctrica. El noroeste argentino, y en particular la provincia de Tucumán, tienen gran disponibilidad de biomasa, caracterizándose por la gran diversidad agroindus-

trial, centrada principalmente en cultivo de caña de azúcar y de cítricos, la poda de frutales y la producción de sus derivados.

El consumo total de biomasa con fines energéticos a nivel nacional se estimó en 10 987 015 toneladas. Los sectores demandantes Considerados fueron la industria azucarera (50%), la autogeneración (19%), las carboneras (11%), los hogares (6%), las panaderías (4%), el procesamiento de yerba mate (4%), las parrillas (2%), el procesamiento De té (2%), y las ladrilleras, las cementeras, las escuelas rurales y el procesamiento de tabaco (2% en conjunto) (Denaday *et al.*, 2020). El balance de biomasa para fines energéticos revela un superávit en la mayor parte del territorio argentino. La oferta principal se da en provincias como Tucumán que tienen industrias generadoras de residuos biomásicos, como los ingenios. De modo análogo, la mayor demanda proviene de sitios con industrias que generan energía (Denaday *et al.*, 2020).

La información cuantitativa y cualitativa que resulta del presente trabajo es indispensable para proyectar diferentes escenarios, ya que la transformación del sector energético argentino requiere de grandes inversiones de capital, el acondicionamiento del sistema eléctrico nacional y la identificación y cuantificación de los recursos renovables. Por otro lado, esta información colabora con la toma de decisiones técnica y financieramente aumentando la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.

El desarrollo de la matriz energética en base a las energías renovables presenta diversas ventajas, tales como:

- Agregado de valor al sector agropecuario, forestal y forestoagroindustrial;
- Generación de empleo;
- Disponibilidad local;
- Aumento de la eficiencia productiva;
- Conversión de pasivos ambientales (residuos, efluentes) en materia prima energética;
- Redistribución de ingresos hacia el sector rural;
- Facilidad de conservación y almacenamiento.

La disponibilidad local se destaca como ventaja del presente trabajo, donde el residuo de cosecha de caña puede ser recolectado por métodos convencionales o con nuevas técnicas de cosechas integradas que ponderan el despunte de la caña antes de dejarlo en el suelo, a menores costos. El volumen de RAC de caña de azúcar factible de recolección por hectárea cultivada depende del rendimiento, la tecnología empleada y las características y necesidades edáficas de la zona. Por recomendación de técnicos regionales, se empleó un promedio potencial de 5 t/ha año (Denaday *et al.*, 2020).

La principal dificultad que presenta el estudio es que el RAC es un material de baja densidad por lo que los costos de logística son elevados y no todos los pequeños productores tienen acceso a la tecnología para su recolección. Sin embargo, el

biocombustible sólido desarrollado (pellets de RAC) presenta cualidades suficientes para ser utilizado en la industria y en los procesos de calefacción comerciales e incluso, incorporando técnicas de mejoramiento y sistemas de calidad a la producción de pellet, podría llegar a utilizarse para calefacción doméstica. Esto representa la posibilidad de reemplazo de combustibles fósiles y un biocombustible de mayor accesibilidad local que a su vez genera nuevos puestos de trabajo en la región.

Adicionalmente, si bien este modelo se basa en el RAC, es un modelo de estudio y validación para otros residuos agrícolas que podrían llegar a industrializarse y valorizarse para impulsar las economías regionales en diferentes lugares de Latinoamérica. A partir de esto, se recomienda la proyección del análisis de estudio a otras biomásas residuales también abundantes en la región. En este sentido, el desarrollo de escenarios futuros, el análisis para el desarrollo de plataformas de biorefinerías, y los estudios sobre la ubicación óptima de plantas consumidoras de biomasa con fines energéticos, facilitarán la formulación de políticas públicas y estrategias energéticas.

8. Referencias

- AS 1038.3. Coal and coke - Analysis and testing Proximate analysis of higher rank coal.
- AS 1038.5.1. Coal and coke—Analysis and testing Part 5: Gross calorific value.
- AS1038.6.1. Coal and coke - Analysis and testing - Higher rank coal and coke - Ultimate analysis Carbon and hydrogen.
- AS1038.8.1. Coal and coke - Analysis and testing Coal and coke - Chlorine - Eschka method.
- ASTM D 3177-02. Total Sulfur.
- ASTM D3173-03. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.
- ASTM D5142-02. Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures.
- ASTM D5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke
- ASTM D7582-12. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis.
- ASTM E776- 87. Standard Test Method for Forms of Chlorine in Refuse-Derived Fuel.
- Centro Azucarero Argentino. (2017). Proceso Productivo: Azúcar: Fuente natural de energía de fácil y rápida asimilación. <http://centrozucarero.com.ar/azucar/>
- De Palma K. R., García-Hernando N., Silva M. A., Tomaz E. & Soria-Verdugo A. (2019). Pyrolysis and Combustion Kinetic Study and Complementary Study of Ash Fusibility Behavior of Sugarcane Bagasse, Sugarcane Straw, and Their Pellets. Case Study of Agro-Industrial Residues. *Energy fuels*, 33: 3227-3238.
- Denaday F, Escartín C, Parodi G, Spinazzola E, 2020. "Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina". FAO. 2020. Colección Documentos Técnicos N.º 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- Devi G. K., Vignesh K & Chozhavendhan S. (2020). Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts. Effective utilization of sugarcane trash for

-
- energy production. *Technology, Advances, Life Cycle Assessment, and Economics*, 12: 259-273.
- FAO (2009). *WISDOM Argentina, Análisis del balance de energía derivada de Biomasa en Argentina*. FAO 2009.
- EN 14961-1. (2010) *Solid biofuels e fuel specifications and classes e part 1: general requirements*. Brussels: CEN.
- EN 14961-2. (2011). *Solid biofuels e fuel specifications and classes e part 2: wood pellets for non-industrial use*. Brussels: CEN.
- Fandos C., Scandaliaris P., Carreras Baldrés J. I., Soria F. J., Giardina J., De Ullivarri J. F. & Romero E. R. (2020). *Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Area cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2020 en Tucumán. Reporte agroindustrial, ISSN 2346-9102*.
- Feijóo E. A., Golato M. A., Franck Colombres F. J., Paz D. & Cárdenas G. J. (2015). *Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán*. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*, 92(2): 23-32.
- ISO 11722. (2013). *Solid mineral fuels -- Hard coal -- Determination of moisture in the general analysis*.
- ISO 17225-5. (2014). *Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 5: Graded firewood*.
- ISO 17828. (2015). *Solid biofuels - Determination of bulk density*.
- ISO 17831-1. (2015). *Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets*.
- ISO 18846. (2016). *Solid biofuels - Determination of fines content in quantities of pellets*.
- ISO 1928. *Solid mineral fuels – Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value*.
- ISO 351. *Solid mineral fuels -- Determination of total sulfur -- High temperature combustion method*.
- Janke L., Leite A., Nikolauz M., Schmidt T., Nelles M. & Stinner W. (2015). *Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing*. *Int. J. Mol. Sci.*, 16: 20685-20703.
- Maués J. A. (2008). *Optimisation of power generation from baggase and sugarcane waste in a brazilian sugar and alcohol mill*. *ISES Solar World congress: Solar Energy and Human Settlement*, 2445-2448.
- Ministerio de Hacienda. (2018). *Secretaría de Política Económica, Informes de cadenas de valor - Azucarera, N°3, junio*.
- Muñoz M. (2017). *Potencial de los Residuos Agrícolas de Cosecha de Caña de Azúcar, como un biocombustible*. https://www.researchgate.net/publication/320087116_Potencial_de_los_Residuos_Agricolas_de_Cosecha_de_Cana_de_Azucar_como_un_biocombustible.
- Paredes M. V., Pérez D. R., Casen S. & Romero R. E. (2016). *"Factibilidad técnica-económica de la recolección y enfiado del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) para su utilización con fines energéticos en Tucuman en la zafra 2015*. *Asociación Argentina de economía Agraria*, 1: 3-8.
-

-
- Portocarrero R., Ullivarri E., Valeiro A. & Vallejo J. (2017). Los residuos de la industria sucro-alcoholera Argentina. Serie: gestión de residuos de la industria sucro-energética argentina, INTA – EEA Famaillá, 8-9.
- PROICSA (2013). Caracterización de las cooperativas de productores de caña de azúcar de Tucumán, EEAOC.
- Reyes Montiel J. L. (2003). La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Centro Azúcar*, 30(2): 1-14.
- Rípoli T. C. C., Molina W. F. & Rípoli M. L. C. (2020). Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. *Scientia Agricola*, 57(4): 677-681.
- Sampaio I. L. M., Cardoso T. F., Souza N. R. D., Watanabe M. D. B., Carvalho D. J., Bonomi A. & Lopes Junqueira T. (2019). Electricity Production from Sugarcane Straw Recovered Through Bale System: Assessment of Retrofit Projects. *BioEnergy Research*, 1-13.
- Sommersacher P., Brunner T. & Obernberger I. (2012). Fuel Indexes: A novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion test sample by drying in nitrogen. *Proprieties of New Biomass Fuels. Energy Fuels*, 26: 380-390.
- Tumuluru J. S. (2018). Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resour Convers* 1:44–54
- UNE-EN 15103. Solid biofuels - Determination of bulk density.
- UNE-EN 15149-1. Solid biofuels - Determination of particle size distribution - Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above.
- Vats N., Khan A. A. & Ahmad K. (2019). Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations. *Energy*, 185: 1100-1105.
- WISDOM (2009). Argentina, Análisis del balance de energía derivada de Biomasa en Argentina. FAO.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso XII, 2021: 247-266
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO XII. Cocinar y calefaccionar con residuos de poda. Promover la apropiación de tecnologías eficientes y de bajo costo desde el espacio comunitario

Pablo Orestes Kulbaba^{1*}, Pamela Carolina Natan², Santiago Garrido³

¹ *Profesional independiente, Chascomús, Buenos Aires, CP 7130, Argentina*

² *Profesional independiente, Ciudad de Buenos Aires, CP 1424, Argentina*

³ *IESCT-UNQ-CICBA, CONICET, Bernal, Provincia de Buenos Aires, CP1876, Argentina*

Resumen. El potencial que presentan los dispositivos que utilizan biomasa residual de ser autoconstruidos a partir de materiales naturales y de bajo costo, representa una oportunidad para su adopción masiva. Este capítulo documenta dos experiencias de bioconstrucción en Argentina que ejemplifican los procesos asociados, las dinámicas solidarias, la calidad de la presencia del Estado y deja asentado un mapa de ruta a fin de incrementar las posibilidades de éxito de iniciativas a futuro. En el primer caso, se describe la construcción de un horno chileno y una estufa PAR organizada desde la autogestión en un comedor comunitario de Lanús; en el segundo, se trata de un programa de construcción de Estufas Rocket Jota financiado por fondos públicos que alcanza 26 viviendas en la localidad de El Bolsón, Río Negro. Del análisis y autoevaluación de ambas experiencias, se evidencia la necesidad de aceitar mecanismos de intervención con llegada a un público amplio, de fomentar redes para el intercambio recíproco de experiencias, la importancia de la planificación y organización a la hora de concretar proyectos carentes o escasos de recursos económicos pero abundantes en voluntad y compromiso social, el rol mayor de los espacios comunitarios como lugar de encuentro, intercambio y de transformación social y el impacto positivo que representaría propiciar la conformación de una cooperativa o rueda de mingas de construcción de estufas que satisfaga las necesidades de las propias personas que la integran.

*Correspondencia: Pablo O. Kulbaba. E-mail: pablokulbaba@gmail.com

1. Introducción

Promover el uso de tecnologías de cocción y calefacción eficiente es un imperativo no sólo ambiental, sino también social en tanto mejora el confort habitacional, optimiza los tiempos y recursos destinados a la obtención del combustible, la salud del usuario y por ende, la calidad de vida de la población. En este sentido, el potencial que presentan los dispositivos que utilizan biomasa residual de podas, cajones de fruta y pallets de ser autoconstruidos a partir de materiales naturales y de bajo costo, representa una oportunidad para su adopción masiva. No obstante, existe un desconocimiento generalizado en relación a dicha posibilidad: numerosos mitos estigmatizan el uso de leña como combustible, al barro como material constructivo y a la autoconstrucción comunitaria como vía posible de hacer y transformar realidades haciendo uso de las propias manos.

Entre las experiencias existentes, que están relativamente poco documentadas, las modalidades más frecuentes de acción están vinculadas a grupos autogestionados asistidos por profesionales o entusiastas independientes, a la intervención de instituciones no gubernamentales (ONGs y Fundaciones), y a aquellas con apoyo total o parcial del Estado, sea con técnicos propios o bien mediante la contratación de consultores externos. Esta última modalidad pareciera ser la de menos: las burocracias propias del sistema estatal, los cambios de gestión y la mayor/menor voluntad política entorpecen la llegada al territorio para efectivizar proyectos innovadores, participativos y de carácter social.

Este capítulo documenta dos experiencias de bioconstrucción que ejemplifican los procesos asociados, las dinámicas solidarias, la calidad de la presencia del Estado y deja asentado un mapa de ruta a fin de incrementar las posibilidades de éxito de iniciativas a futuro:

- en el primer caso, se trata de dos intervenciones puntuales con recursos autogestionados en un comedor comunitario de la localidad de Monte Chingolo, Lanús, Argentina, durante las cuales se construyó un horno chileno y una estufa PAR;
- en el segundo, se detalla la concepción y ejecución de un programa de construcción de Estufas Rocket Jota (ERJ) financiado por fondos públicos que alcanza 26 viviendas en la localidad de El Bolsón, Río Negro, Argentina.

El denominador común es la transferencia de tecnologías de cocción/calefacción a la comunidad, materializadas en formato de encuentros colectivos de construcción como *mingas* (la minga es una práctica frecuente en las poblaciones campesinas e indígenas de Sudamérica que se basa en reuniones de trabajo comunitario y gratuito entre amigos y vecinos. Estas prácticas traen implícito un principio de reciprocidad y tienen raíces ancestrales entre los pueblos andinos: el término viene del quechua) y talleres.

En tal sentido, se pretende abordar una reflexión comparativa de cada tipología de intervención -una de carácter auto-gestionada, la otra con intermediación del Estado- cada cual con sus potenciales, limitaciones, aciertos y desafíos. Se presenta una breve descripción de los aspectos técnicos de los dispositivos construidos, luego se detallan por cada experiencia las etapas recorridas de idea-proyecto, planificación, logística y ejecución, con énfasis en el contexto social en que están inmersos y las actividades que se realizaron para integrar a los diversos actores. En un último apartado se identifican los problemas y oportunidades de mejora tanto de la construcción como del uso y mantenimiento de los dispositivos, los impactos positivos, las expectativas secundarias no cumplidas.

2. Desarrollo

2.1. Aspectos técnicos comunes de los tres dispositivos

Los tres dispositivos se caracterizan por ser apropiados, desde el momento en que incluyen:

- Materialidad orientada hacia un balance óptimo entre durabilidad, accesibilidad económica y disponibilidad local.
- La implementación de materiales de construcción naturales, minimizando los de origen industrial. El mortero es tierra cruda y arena, lo que hace que la huella de carbono del conjunto sea muy baja (comparado con el cemento o la cal).
- La herrería (piezas metálicas con soldadura) está llevada a una mínima expresión, para reducir costos. Si bien la herrería es un arte de suma utilidad y nobleza, poder prescindir parcial o totalmente de ella hace que sean más accesibles. No obstante, es de destacar que incluir este tipo de piezas en los dispositivos mejora su desempeño y terminación.
- El buen aprovechamiento del recurso biomásico, incluso valorizando materiales que suelen ser descartados.
- Optimización del tiempo de las personas, que es el recurso escaso común, sin importar el contexto social, ambiental o económico.

Tabla 1. Comparación entre estufa PAR6 y ERJ8

Característica	PAR6	ERJ8 (sólo módulo estufa, sin banco)
Lista básica de materiales	200 ladrillos cocidos 4 ladrillos huecos del 12 2 cerámicos de 40x40cm	178 Ladrillos cocidos 9 ladrillos refractarios 1 tambor de 200 litros 1 latabalde de 20 litros 60 litros de perlita
Puerta	Si. Se puede usar una puerta económica fabricada local con poca soldadura. No es indispensable para su funcionamiento, aunque si mejora mucho la eficiencia	Si. Esa función la cumple una latabalde de 20 litros.

Característica	PAR6	ERJ8 (sólo módulo estufa, sin banco)
Inercia térmica (Cantidad de minutos desde su encendido para empezar a entregar calor)	15	5 (el tambor da calor de manera inmediata)
Ancho y profundidad [cm] (superficie en m2)	45x66 (0,30)	65x105 (0,68)
Altura [cm]	145	99
Potencia bruta [Kcal/h]	14.400	12.600
A favor en general	<p>Baja cantidad de materiales.</p> <p>Desarrollo de un individuo (Pablo Kulbaba/Hacono) Prescinde del uso de tambor o de perlita.</p> <p>La puerta puede ser hecha de manera muy sencilla, sin marco ni bisagras</p> <p>Dimensiones de base reducidas (del porte de una heladera)</p> <p>Buena velocidad de entrega de calor y combinación con inercia térmica.</p> <p>Potencia versátil</p>	<p>Modelo con 25 años de antigüedad.</p> <p>Desarrollo de un individuo (Ianto Evans, Un galés viviendo en USA)</p> <p>Muy popular a nivel mundial, con mucha gente que la ha replicado.</p> <p>Puede tener asociado un banco de masa.</p> <p>Excelente combinación de velocidad de entrega de calor e inercia térmica</p> <p>Modelo implementado en proyecto de estufas sociales en localidad de El Bolsón, Río Negro. Con financiación a través del MDS Nación.</p>
En contra	No puede tener asociado un banco de masa	<p>La carga horizontal y el fuego en dirección horizontal son contra intuitivos para la cultura Argentina de estufas.</p> <p>El impacto estético del tambor puede resultar desagradable para un sector de los usuarios.</p>

2.2. Estudios de caso

CASO I. La intervención auto-gestionada: el caso de las acciones en el comedor "La Sartén por el Mango"

"La Sartén por el Mango" (<https://socialopportunitygroup.com/home>) de la Fundación ARCHÉ es un comedor de alimentación saludable para niños, niñas y jóvenes de Monte Chingolo -conurbano bonaerense-, que también ofrece un espacio de contención, educación integral y vinculación comunitaria. El proyecto inició en el 2013 y se desarrolla en un predio que en los últimos años se ha ido acondicionando gracias a padrinzgos, donaciones y voluntariado. Así, se ha construido una cocina, comedor, cancha de deportes, taller de herrería, de costura, feria americana y salón de usos múltiples; también hay un sector de huerta y compostaje. Con la intención de que

los participantes se apropien del espacio en tanto lugar de encuentro, desarrollo y experimentación es que las actividades de uso, acondicionamiento y mejora la realizan ellos mismos. Asimismo, se realizan actividades integradoras donde participan las familias para poder colaborar en la resolución de conflictos comunes.

El proyecto se sostiene gracias al trabajo voluntario de muchas personas con fuerte sentido social, donaciones y los ingresos que genera un café ubicado en Melbourne, Australia llamado The Final Step (TFS). El proyecto se sostiene gracias al trabajo voluntario de muchas personas con fuerte sentido social, donaciones y los ingresos que genera un café ubicado en Melbourne, Australia llamado The Final Step (TFS).

Los dispositivos construidos

Horno de tambor/mixto/chileno

El horno de tambor es una idea originaria de África de los años '70, se populariza en Latinoamérica de la mano del ingeniero chileno Pedro Serrano Rodríguez (1987, 1988). La tecnología llega a Argentina cruzando la cordillera de la mano del albañil y bioconstructor Jorge Belanko, en los inicios de los años '90. Belanko construyó varios de estos hornos en la comarca andina, y también construyó uno de éstos en el primer curso de permacultura que tuvo lugar en la localidad de Navarro, pcia de Buenos Aires, Argentina, en 1996. Pablo Perret es otro de los referentes en esta tecnología. El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2011) documenta el paso a paso para su construcción y la incorpora en la difusión de tecnologías para la agricultura familiar a partir del programa PROHUERTA.

Se construye con mampostería de ladrillo crudo o cocido, posee una cámara de combustión separada de la cámara de cocción (el tambor) y dimensiones aproximadas de 1 x 1 m y 1,60 m de altura. Se diferencia del llamado "horno de media naranja", tecnología vernácula previa de cocción a leña, en los siguientes aspectos:

- Es un horno blanco, es decir que el humo del fuego no entra en contacto con la comida. Esto permite, en entornos urbanos, valorizar como combustible ciertos materiales derivados de la biomasa residual como podas y cajones de frutas y verduras.
- La masa/inercia térmica se encuentra rodeando el tambor, pero no entre los gases y el tambor, por lo tanto es de rápida respuesta térmica, a la vez que incorpora la inercia térmica de la piel exterior.

Estufa PAR

Fue diseñada por Pablo Kulbaba en el marco de una ola de frío que asoló al país en el invierno de 2019. Sus características principales son:

- Cámara de combustión horizontal. Similar a lo que el usuario común está acostumbrado a usar. No es necesario romper paradigmas para su uso.
- Minimizar la cantidad de ladrillos a utilizar. Así, el diseño implementa 200 ladrillos cocidos.
- Sin aislación de la chimenea interna. Esta aislación se elimina puesto que se comprobó que no afecta el funcionamiento apropiado de este diseño.

- Funcionamiento con puerta abierta sin ingreso de humos. El funcionamiento de cualquier estufa es mejor con una puerta que controle la cantidad de aire que ingresa a la caja de fuego. Sin embargo, es muy posible abaratar costos de estufas si las puertas pueden ser obviadas, o autoconstruidas. El buen tiraje de esta estufa hace que el encendido sea muy fácil e intuitivo.

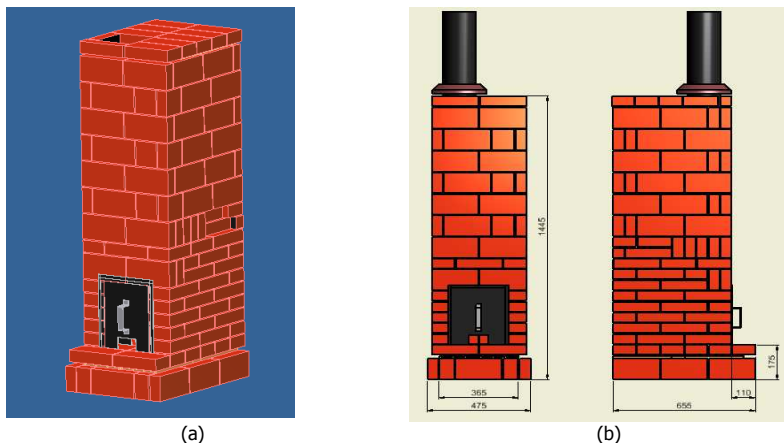


Figura 1. a) Perspectiva estufa PAR6 y b) medidas generales estufa PAR6 (Fuente: elaboración propia).

Etapas del proyecto y su ejecución

En abril de 2017 la tallerista (Pamela Natan) entra en contacto con “La Sartén por el Mango” a fin de poder sumar al comedor propuestas innovadoras y alineadas con el uso de energías renovables. Puesto que hasta ese momento la cocina dependía únicamente de gas natural, se efectúa la propuesta de generar una actividad de autoconstrucción del horno de tambor. Se solicitó la colaboración económica a conocidos para costear parte de los materiales, y se estipuló que la remuneración - simbólica- a la facilitadora se efectúe a partir del pago de un arancel por parte de los participantes ajenos al barrio. Los vecinos y vecinas de Monte Chingolo fueron invitados a participar sin costo alguno, entendiéndose que de lo contrario el factor económico podría resultar una barrera a la accesibilidad.

En el caso de la estufa PAR, materializada en agosto del 2019, la iniciativa surge igualmente por una motivación social por parte del tallerista (Pablo Kulbaba). De igual forma, los materiales se obtuvieron solicitando ayuda económica a conocidos que quisieron apadrinar el proyecto, y los honorarios simbólicos del tallerista fueron cubiertos por la caja chica de la Fundación.

En ambos casos, se evidencia el carácter social y voluntarioso, lo cual a su vez necesita de una organización, planificación y difusión afín para lograr el cometido:

que la comunidad participe y adquiera una herramienta de autonomía en cocción/calefacción.

Organizarse, planificar y difundir la actividad

Tanto para la instancia de construcción del horno de tambor (mayo y junio 2017) como de la estufa PAR (agosto 2019) esta etapa se realizó en formato semi-presencial. A través del intercambio de fotografías y especificaciones, se elaboraron los siguientes documentos: i) Diseño curricular de la propuesta: detallando contenidos, objetivos, materiales y herramientas necesarios; ii) Documento de actividades previas: especificaciones técnicas para los trabajos de herrería, acopio de materiales, selección de la tierra, tamizado e hidratación para obtener la barbotina para el mortero de barro; iii) Flyer de difusión: en formato digital para la publicación en redes sociales y la invitación a los familiares de los niños y niñas vía Whatsapp; iv) el replanteo, base y capa hidrófuga se hizo unos días previos al lanzamiento del taller abierto, con la presencia de la tallerista.

Talleres con niños y niñas

En el caso del horno, se realizaron diversos juegos tendientes a que los niños y niñas sean partícipes del proceso constructivo, trabajando la noción del “yo puedo”, buscando estimular sus capacidades creativas a través de la manipulación de materiales naturales y haciendo hincapié en la apropiación del horno desde su concepción, como vía para favorecer el cuidado del mismo una vez que entre en funcionamiento.



Figura 2. a) Juego con los niños y niñas para preparar la tierra y b) taller explicando componentes del mortero de barro (Fuente: elaboración propia).

En la instancia de terminaciones fueron los chicos quienes trabajaron directamente sobre el horno, aplicando la mezcla, realizando relieves decorativos y pegando cerámicas en el zócalo. Dos mamás se acercaron a participar en estas tareas.

En el caso de la estufa PAR, que se construyó a los dos años de estar en funcionamiento el horno, tuvo una mejor acogida por parte de la organización y usuarios del comedor puesto que ya estaban familiarizados con un dispositivo a leña en el predio. En esta segunda instancia, se invitó a tres jóvenes pre-adolescentes (entre 12 y 13 años) que venían presentando situaciones de mucho conflicto familiar a participar del taller con adultos para generar una instancia para fortalecer su confianza en sus capacidades de "hacer" y relacionarse en otros entornos.

Talleres con adultos

Los talleres estuvieron dirigidos a los familiares de los niños, los trabajadores y voluntarios del comedor y la comunidad en general. La intención fue no sólo brindar un producto terminado –el horno y la estufa- para su uso en el comedor sino también ofrecer una herramienta de replicabilidad en sus propios hogares y/o que mejore su autonomía laboral al generar un espacio de práctica y adquisición del "saber-hacer".



Figura 3. a) Taller de autoconstrucción de horno de tambor y b) Taller de autoconstrucción de estufa PAR (Fuente: elaboración propia).

En el caso del horno, la construcción se efectuó a lo largo de tres días; la estufa PAR se planificó y materializó en dos jornadas completas, que culminaron en el encendido del dispositivo. En términos generales la participación fue reducida. Es un desafío lograr que los familiares y la comunidad en general participen activamente en las propuestas que surgen en el comedor. Se observó que a pesar de los esfuerzos de comunicación en dar a conocer la propuesta, no fue hasta que el horno/la estufa estuvieron funcionando que la comunidad tomó dimensión de lo que se había realizado. De hecho, para ilustrar el punto anterior, el segundo día de construcción de la estufa se organizó en paralelo un bingo con presencia de más de cincuenta personas. Esto da cuenta que los canales de comunicación a aceitar no son sólo hacia afuera sino, y por sobre todo, hacia dentro de la misma organización o usuarios del predio. Para ello, se hace indispensable la labor de difusión con esfuerzos adicionales a los de los talleristas.

Balance y autoevaluación de las actividades

Es de destacar la importancia de efectuar una autoevaluación entre todos los participantes para favorecer que todos participen y sean críticamente constructivos del proceso de organización y ejecución del taller. Para ello, es necesario plantear dinámicas grupales que incluyan la expresión no sólo verbal sino gráfica, considerando que no es sólo la palabra la única herramienta de comunicación. En este sentido, es necesario considerar que algunos pueden sentirse más cómodos planteando sus devoluciones o evaluación desde el anonimato. A modo de ejemplo, se detallan en la Tabla 2 los problemas detectados durante la construcción del horno y cómo su identificación permitió definir oportunidades de mejora que son lecciones para eventos futuros.

Tabla 2. Problemas y oportunidades de mejora identificados en la construcción del horno de tambor

Problemas detectados	Oportunidades de mejora
General	
Ausencia de material visual (láminas) para que los participantes comprendan lo que se va a construir En el trabajo que se realizó con los niños, faltó advertir previamente a los familiares/responsables respecto de la actividad y la necesidad de enviar una muda de ropa limpia	Elaborar e imprimir láminas que sirvan de soporte pedagógico para los participantes que desean visualizar el objeto a construir y el paso a paso. Dedicar un momento del taller o del pre-taller a presentar en detalle la actividad que se realizará – considerar que en las ciudades “hacer un horno de barro” puede sonar descabellado. Prever una nota informando a los padres de la necesidad de enviar una muda de ropa los días que se trabaje con tierra
Materiales	
Ladrillos insuficientes y de mala calidad Caño de tiraje con menor sección de la requerida	Cambiar de proveedor de materiales Verificar funcionamiento y de ser necesario cambiarlo
Herrería	
Poca claridad en las instrucciones referidas a la forma de abrir el tambor. Esto implicó que en lugar de desgastar el reborde y obtener así una tapa con cierre adecuado, quede una ranura por la que se escapa parte del calor. No se dieron las instrucciones para hacer la	Revisar y mejorar la guía de actividades previas incluyendo más detalle e ilustraciones de cada uno de los pasos a realizar

manija y la traba aprovechando la tapita que viene por defecto en el tambor.

No se dieron las indicaciones para hacer la ranura del tiraje en la puertita de carga de leña

No se indicó la distancia mín/máx entre el soporte del difusor (los hierros) y el difusor propiamente dicho (la chapa)

Asimismo, se destacan otros impactos positivos que se derivaron de las intervenciones:

-Como el horno está revocado con tierra, es importante evitar que entre en contacto con el agua de lluvia. Esto motivó a que los usuarios del comedor se organizaran para construir un techo que permite su uso en días de lluvia y protege el acopio de la leña. Cuando en el predio se organizan ferias u otro tipo de eventos, dicho espacio se constituye en el "Patio de Comidas".

-Lo interesante de la experiencia de autoconstruir, es que también se aprende a reparar. De este modo, ante la aparición de grietas y fisuras propias del uso y secado, los mismos usuarios preparan la mezcla para cubrirlas.

-Uno de los participantes se enteró a partir del grupo de Facebook Mardelfuego, (espacio de intercambio entre aficionados del fuego y del barro) que en su barrio se iba a llevar a cabo la construcción del horno. Participó en todas las jornadas de construcción y sumó a la huerta unas cuantas plantitas aromáticas para atraer insectos benéficos.

-Se generó una memoria descriptiva gráfica, con paso a paso de libre descarga y acceso para participantes y comunidad en general.



Figura 4. A tres años de su construcción, el horno de tambor sigue activo – fue utilizado durante el aislamiento social, preventivo y obligatorio para producir panes para las familias del barrio en emergencia (Fuente: elaboración propia).

CASO II. La intervención con intermediación del Estado. 26 estufas Rocket JOTA en la Localidad de El Bolsón.

Estufa Rocket Jota (ERJ)

Este modelo de estufas surge aproximadamente en los años '80 en Centroamérica. El galés radicado en USA Ianto Evans (2006) documenta en profundidad el diseño, constituyendo ese manual una referencia para quienes se inician en la actividad estufero en Argentina y la región. La difusión de esta tecnología es en buena parte gracias a la traducción al castellano por parte de Conrado Tognetti de este libro. Recién con la publicación Gallo Mendoza et al. (2020) surge bibliografía original local relacionada a la tecnología rocket.



Figura 5. Estufa Rocket Jota construida en el marco del proyecto en El Bolsón (Fuente: elaboración propia).

En el artículo de Tognetti y González (2014) se registran experiencias de capacitación de construcción de ERJ institucionalizadas en el Centro de Educación Agropecuaria N°3 (CEA 3), Paraje Mallín Ahogado, El Bolsón, provincia de Río Negro. El éxito de la ERJ radica en sus características, que además de las compartidas con la tríada de dispositivos descritos en este artículo, se suman:

- Aprovecha el efecto chimenea dentro de la estufa, por lo que la succión de aire de combustión está relacionada con el régimen de combustión. El agregar una chimenea dentro de la estufa implica que hay dos chimeneas, la interna y la de salida. Ambas traccionan de los gases, por lo que la chimenea de salida requiere una temperatura de gases inferior para seguir funcionando, otorgando mayor eficiencia que las estufas convencionales. Esto redundo en un aprovechamiento mayor de la energía dentro de la vivienda.

-
- Combina mecanismos de transferencia de calor inmediatos y de inercia térmica. El primero está dado por un tambor metálico de 200 litros, que ofrece entrega de calor a los diez minutos de encendida la estufa. El segundo mecanismo está dado por las superficies constituidas de ladrillos que le confiere inercia térmica. El video: "Partes de una estufa rocket JOTA" amplía en este tema.
 - El uso del efecto chimenea permite que se acople a la estufa un banco de masa, que es un sillón construido en ladrillos y mortero de tierra cruda y arena. Por su interior circulan los gases de combustión, antes de salir por la chimenea. Este banco de masa es un sillón que combina la posición de sentado/acostado, con el calor tibio de 30-35°C de su superficie.

El origen del proyecto y el enlace con el Ministerio de Desarrollo Social de la Nación (MDS).

En el otoño de 2017, Ramiro Walti (co-tallerista en este proyecto junto a Pablo Kulbaba), construyó una ERJ en la localidad de El Bolsón. Un técnico de la Secretaría de Desarrollo Social Local (SDSL) presenció esa estufa en funcionamiento y notó las bondades del dispositivo. Ese fue el disparador del proyecto. En septiembre de 2019 -2 años después- el MDS depositó en las arcas municipales el dinero requerido para desarrollar el proyecto y la primer estufa se construyó el 31 de octubre de 2019.

La identificación de proveedores, cotizaciones, logística y acopio fue una tarea que asumió la SDSL. Varios ítems son voluminosos, por lo que se acondicionaron galpones de la repartición pública para acopiarlos. Los ítems principales de la lista de materiales:

- 1 tambor de 200 litros
- 1 fardo de paja
- 1 hoja de chapa galvanizada calibre 25 de 1,22 x 2,44 m
- 1 lata balde de 20 litros
- 1 kit de chimenea de 6" (2m de caño, un codo 90° y un sombrero huracán)
- 500 ladrillos cocidos
- 9 ladrillos refractarios
- 0,5 m3 arena
- 0,3 m3 de arcilla

El aspecto de trabajo social en la preparación tuvo 3 dimensiones mayoritarias, hacia adentro y hacia afuera de su estructura: a) Selección de las familias que recibirían las ERJ; b) Convocatoria y selección de los aprendices y c) Acondicionamiento del aparato municipal para poder lidiar con la logística de cada estufa. Las familias fueron seleccionadas en base a estos criterios: mujer jefa de familia; hijos viviendo en la casa; familiar a cargo con alguna enfermedad crónica; hogar en situación de vulnerabilidad: beneficiarios del Plan Calor. Los 5 aprendices por estufa: uno de ellos miembro o allegado de la familia beneficiaria. Esto se propició para fomentar aún más la apropiación de la tecnología. Los otros 4 aprendices, prioritariamente locales,

se inscribieron a partir de la convocatoria que realizó la municipalidad por radio, televisión y redes sociales.

La SDSL proveyó las soluciones de logística previstas, y las imprevistas también, teniendo un rol clave, incluyendo: i) Compra, logística, acopio y distribución de materiales; ii) Traslado de los facilitadores y aprendices cuando los beneficiarios estuvieran localizados a gran distancia y iii) Gestión a partir de la economía social de las viandas de almuerzo de los facilitadores y aprendices.

- El proyecto incluyó 26 ERJ y se dividió en dos ciclos iguales, cada uno de 13 estufas.
- Una clase teórica para todas las familias y para todos los aprendices de esa etapa.
 - 10 ERJ construidas en modalidad taller: 1 familia beneficiaria, 5 aprendices y 2 facilitadores con presencia full durante 2-3 días.
 - 3 ERJ construidas en modalidad autoconstrucción: 1 familia beneficiaria, 5 aprendices experimentados (tuvieron que haber participado de alguno de los 10 talleres anteriores) y acompañamiento parcial de los facilitadores en tres instancias de 2 horas máximo cada una: i) Inicio de la obra y replanteo; ii) Seguimiento; iii) Encendido y validación, o corrección (video: "Primer encendido de una estufa rocket JOTA"; iv) Evaluación interna.

Aprendizajes de la implementación del proyecto en el territorio.

Apertura y clase teórica del primer ciclo.

Se realizó en la Casa del Bicentenario de El Bolsón. Se trata de un espacio que cuenta con una sala con aproximadamente 200 butacas, escenario y pantalla con proyector.



Figura 6. Clase teórica del proyecto de construcción de ERJ en El Bolsón (Fuente: elaboración propia).

Se convocó a las 13 familias beneficiarias y a los 50 aprendices que se habían anotado previamente. En el acto participaron el intendente y autoridades del MDS y SDSL, con medios informativos. Se realizó la clase teórica de 5 horas de duración. La jornada terminó con la distribución de los aprendices en los talleres, y asignación de fechas. Se prepararon afiches y se los colgó en los muros, uno por cada una de las 13 estufas. Estos afiches incluyeron estos campos: fecha de realización; apellidos de la familia beneficiaria; barrio y domicilio; espacio para anotar 5 inscriptos.

Fue importante la moderación y acompañamiento de la SDSL en esta instancia para ordenar y consensuar fechas de familias con fechas de los facilitadores. Las 3 estufas de autoconstrucción no recibieron inscriptos en esta etapa, pues era condición fundamental haber participado de alguno de los 10 talleres previos.

El acopio previo se realizó en dos depósitos para los materiales y en uno pequeño con seguridad para el guardado de herramientas, junto a las oficinas de SDSL. Resultó fundamental el control de inventario. Aprendizaje: En algunos casos fue necesario incluir un tanque de agua de 600 litros, pues en el domicilio donde se realizaría la estufa no había abundante cantidad de agua para construcción.



Figura 7. Uso de la ERJ construída para calentar las viandas del almuerzo (Fuente: elaboración propia).

Las herramientas manuales fueron adquiridas de manera solidaria por parte de los facilitadores. Fue fundamental tener un kit de herramientas ad hoc, en buenas condiciones. En particular, el trompo/mezclador/hormigonera que ahorra tiempo de mezcla del mortero fue provisto por el municipio. El reparto de materiales estuvo a cargo del municipio, entregándolos por adelantado y quedando a pie de obra en cada casa. El proyecto incluyó viandas de almuerzo para los 2 facilitadores y los 5 aprendices. La preparación de este almuerzo fue desarrollada en una cocina de la economía popular.

Si bien El Bolsón es una ciudad de 30.000 habitantes, varias de las estufas realizadas estaban a considerable distancia. Muchas veces los traslados fueron resueltos con vehículos de la SDSL, e inclusive, con vehículos personales de técnicos de esa secretaría.

Un apartado merece el uso de la palabra "armar" en vez de "construir". Esto estuvo relacionado con que en ocasiones, las viviendas que resultaron beneficiarias de estas estufas estaban en irregularidad de posesión del terreno, y la existencia de documentos oficiales con la palabra "construcción" constituye un elemento de valor para derechos posesorios. Usar la palabra "armar" permitió que el proyecto no resultase trabado por circunstancias ajenas al confort térmico. La construcción de las estufas se programó en tres tandas (fines del 2019 y comienzos del 2020) quedando al momento del cierre del artículo la construcción de las últimas 9 por la pandemia de COVID-19. Al momento de redactar este artículo se sigue trabajando para darle el cierre al proyecto.

Cada taller de estufas incluyó: i) Diseño in situ con la familia beneficiaria acerca del uso de la casa y futuras ampliaciones, de las posibilidades de implementación de la estufa y su banco de masa, la selección de la ubicación de los caños de salida de humos. De esta charla se obtenía el diseño consensuado de la estufa, que culminaba con maquetar en el piso con ladrillos el contorno de la construcción. ii) Inicio de la construcción de la estufa.

Además de la construcción de la estufa, los aprendices se llevaron los siguientes conocimientos prácticos:

- Albañilería básica.
- Revoques en barro.
- Nociones básicas de combustión.
- Corte de ladrillos con amoladora y cuchara
- Corte de metal con amoladora.
- Uso de herramientas de mano
- Conexiones de caños de chapa galvanizada (conductos de humos).

El último día, la construcción de la estufa terminaba con una limpieza gruesa de obra, y el encendido de la estufa, con foco en la capacitación de la familia beneficiaria. El video: "Primeras 13 estufas Rocket JOTA8 del proyecto de El Bolsón" da cuenta del antes y después de la intervención.

El desarrollo del proyecto mostró la necesidad de acompañar la actividad con documentación complementaria. Así, por fuera de los alcances y compromisos del proyecto, los facilitadores desarrollaron:

- Plano de ERJ 8 con banco. Hojas del plano con los detalles hilada por hilada.

- Plano de ERJ 8 CORTA con banco. Esta opción permite que la superficie horizontal del tambor quede más cerca de los 90 cm a partir del piso, y eso resulta en una superficie que permite aprovechar mejor el calor.
- Cartilla con nociones básicas de la estufa y recomendaciones de instalación, actualizada con experiencias de obra.
- Canal de Youtube. Esta tarea fue realizada por fuera de lo acordado en el proyecto. Utilizado como soporte del registro audiovisual, incluyendo aprendizajes que surgieron durante el proyecto, como este: "El escudo térmico explicado"



Figura 8. ERJ8 en Instancia de construcción taller (Fuente: elaboración propia).

2.3. Lecciones, balance y autoevaluación:

- Si bien la redacción del proyecto resultó minuciosa en primera instancia, se observa que al trasladar el proyecto al territorio aparecen imponderables que no se ven en el escritorio. Resultó relevante para salvar esta brecha entre lo proyectado y lo real la espalda municipal, expresada a través de la SDSL. Como por ejemplo los traslados de facilitadores y aprendices a los sitios de las estufas y el aporte de agua en aquellos casos donde no había agua de construcción disponible.
- La apropiación por parte de la familia beneficiaria. La expectativa con la que se llegó al territorio fue de llegar a terreno fértil y con ganas de aprendizaje. El tiempo controló las expectativas, al mostrar respuestas diversas. Muchas muy positivas, y algunas no tanto. Se entendió que no todas las familias tienen ganas de aprender, sólo quieren la solución. En un caso particular la familia directamente no se integró al proceso constructivo, simplemente miraban. Se sentían lejanos al proceso.
- El ausentismo de los aprendices en los talleres. El proyecto sucedió en primavera/verano de El Bolsón por el clima más benévolo para la actividad de construc-

ción. Sin embargo, dada la localización andino patagónica, estas estaciones coinciden con la época de mayor demanda laboral de la región (construcción, cosecha de fruta fina y sector turístico) y esto fue en detrimento de la asistencia de los aprendices. La SDSL hizo un esfuerzo adicional con recordatorios telefónicos a los inscriptos en los días previos, así como buscando nuevos inscriptos para reforzar los espacios que quedaban vacantes. Los facilitadores también tuvieron que hacer su parte de esfuerzo, supliendo la mano de obra faltante.

- El encuentro con otras realidades sociales fue un impacto inesperado, y en las líneas que siguen se citan algunas impresiones. El fin es el mismo que el resto del texto aquí presente: registrar aprendizajes para los que transitarán un camino similar, "endurecer el cuero" con anticipación. Solo esa intención. Estos aprendizajes son tanto o más importantes para que el proyecto llegue a buen puerto, que la fórmula para preparar el barro o las proporciones internas de la estufa.
- Fue frecuente ver que la situación de vulnerabilidad familiar se confirmaba, y no sólo incluía la ausencia de confort térmico, sino que también la falta de acceso al agua potable y saneamiento. Viviendas sin una sola canilla de agua dentro de la casa, y letrinas en exterior, con cuatro palos y una frazada como puerta. Incluso casos en que el baño directamente era el bosque.
- Rituales rotos como el almuerzo en grupo, en los que el anfitrión no sabe/puede/no le surge armar la situación del almuerzo mínima: preparar un lugar para comer con una ronda sentados al menos en baldes o cajones, y algunos vasos con agua fresca.
- Situaciones de micro violencia intra familiar, de padres a padres, de padres a hijos y de hijos a animales en la casa. Esencial la cintura de los facilitadores para neutralizar estas situaciones sin generar una escalada.
- Madres solteras llevando adelante familia de varios hijos en situaciones adversas, y aún así, manteniendo vínculos amorosos con ellos.

3. Reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

De la exposición y autoevaluación de ambas experiencias, se destacan los siguientes aspectos a considerar:

- La bibliografía local es insuficiente. Si bien se abordan aspectos técnicos, falta indagar aún más en modalidades de implementación en ámbitos de vulnerabilidad social.
- Importancia de desestigmatizar el uso de leña. Si bien es cierto que localidades como El Bolsón la biomasa se utiliza y es aceptada socialmente como forma de calefaccionar -hay incluso cierto ritual de "ver el fuego"- en zonas más urbanizadas como la ciudad y conurbano bonaerense esas tecnologías parecerían ser marginales, "de pobre" aún si pueden dar una respuesta técnica y socialmente adecuada. Por ello, es preciso prever instancias de sensibilización y de información al respecto de los potenciales de la misma, y de derribar los mitos asociados a su uso.
- Se evidencia la necesidad de aceitar mecanismos de intervención con llegada a un público amplio. En este mismo sentido, hacen falta más y mejores herramientas de transferencia y extensión en los profesionales. Sería conveniente que cada ca-

rrera terciaria tuviera un “servicio social obligatorio” o “servicio cívico” que permita incluir en su formación las capacidades de transferencia y extensión. Esto permitiría llegar a la población con este tipo de soluciones aumentando la cantidad de experiencias exitosas. Asimismo, contribuiría a forjar un sistema integralmente sostenible de acceso universal a profesionales que se dedican a transmitir este tipo de saberes, como quien tiene derecho a acceder a un médico del sistema de salud público o a un abogado en caso de una situación judicial. Y por último, aumentaría el grado de empatía de los graduados, al hacerlos cruzar burbujas de diferentes realidades sociales.

- El correcto desempeño de un sistema de calefacción a biomasa depende de una tríada de factores: El dispositivo, el usuario y el combustible. En estos proyectos se abarcaron los primeros dos. Sería importante acompañar estos proyectos con una mejora en los acopios de leña (estatales y privados) que incida positivamente en la calidad de su producto reduciendo su humedad. Así, acopios con función agregada de secadero, distribuidos en el territorio permitirían aprovechar mejor el recurso biomásico.
- La planificación y organización son importantes a la hora de concretar proyectos carentes o escasos de recursos económicos pero abundantes en voluntad y compromiso social. Esto permite optimizar el tiempo y la energía de los intervinientes, manteniendo la motivación que es el principal motor, y retroalimentando el mecanismo a medida que empiezan a verse resultados palpables.
- Los comedores, merenderos u ollas populares no son sólo espacios de asistencia a los grupos de mayor vulnerabilidad social, sino que se constituyen en lugares de encuentro, intercambio y por ende, de transformación social. Por ello, priorizar las acciones en dichos lugares es validar una innovación en un barrio popular, materializar los dispositivos allí funciona como vidriera para los usuarios y una posibilidad de propiciar la replicabilidad de los mismos a nivel particular.
- Poner en valor el espacio comunitario como lugar de práctica y adquisición del “saber-hacer”, para ofrecer una herramienta que mejore la autonomía laboral de los participantes.
- Propiciar la conformación de una cooperativa o rueda de mingas de construcción de estufas que satisfaga las necesidades de las propias personas que la integran. Para ello, sería preciso diseñar y aceitar mecanismos estatales y comunitarios para la adquisición de los insumos necesarios, y generar las instancias de capacitación de los autoconstructores y/o de la mano de obra que pueda apropiarse de tal saber y convertirlo en su oficio.
- Propiciar la conformación de un Banco de Materiales de construcción.
- Fomentar ámbitos integralmente sostenibles para el intercambio recíproco de experiencias, sin caer en: los grupos de redes sociales donde son pocos los que comparten experiencia y muchos los que consultan sin poner en valor el expertise de quienes hacen de esto su profesión; El funcionamiento exclusivamente a base de gente que dona su tiempo-saber.

Agradecimientos

Proyecto de Monte Chingolo. Al equipo del comedor de alimentación saludable “La Sartén por el Mango” y Fundación Arché por poner a disposición el espacio de experimentación e intercambio con la comunidad, a las personas que colaboraron con mano de obra, difusión, herramientas y apoyo logístico en cada uno de los talleres; a los niños y niñas participantes que son el motor del encuentro.

Proyecto de El Bolsón: No hubiera sido posible llevar adelante este proyecto sin el compromiso más allá de lo esperado inicialmente de los actores que conformaron el equipo, tanto MDS, SDSL, y los facilitadores. Ministerio de Desarrollo Social de Nación: José Martínez, técnico perteneciente al Centro de Referencia de El Bolsón. Secretaría de Desarrollo Social de El Bolsón: Laura Rojas, Rafael Rodríguez, Fabián Arriaga, Salahuddin Ferro, Mingo, Heraldó Riffo. Compañeros del equipo: Ramiro Walti y Andrea González.

Referencias

- Evans I., Jackson L. (2006). Rocket mass heaters: superefficient woodstoves you can build. Cob Cottage Company, Coquille, Oregon, EE.UU.
- Gallo Mendoza L., Rocha E. y Kulbaba P. (2020). Estufas ROCKET BBR - Proceso de construcción. INTA. Obtenido en febrero del 2021 de <https://inta.gob.ar/documentos/estufas-rocket-bbr-proceso-de-construccion>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2011) Construcción del horno de tambor. Paso a paso. Obtenido en febrero del 2021 de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-construccion_del_horno_de_tambor.pdf
- Serrano Rodríguez, P. (1987) Uso eficiente de la leña. Valparaíso: Centro de estudios en tecnologías apropiadas para América Latina (CETAL)
- Serrano Rodríguez, P. (1988) El libro del pan amasado. Valparaíso: Centro de estudios en tecnologías apropiadas para América Latina (CETAL)
- Tognetti, C. y González, A. D. (2014). Capacitación en diseño y construcción de estufas a leña tipo rocket en la Patagonia andina; ASADES; Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 2, pp. 10.19-10.28, 2014.
- Taller de construcción de estufa PAR. Autor: Flor Maistegui; Nombre de usuario del Autor: Cepaes Cepaes; Fecha de publicación: 05/09/2019; Título del Video: Taller de Construcción de Estufa PAR; URL del Video: <https://youtu.be/tPuOHmYsjc4>
- Videos del canal de youtube del proyecto de El Bolsón
- Primer encendido de una estufa Rocket JOTA. Autor: Proyecto 26 Estufas Rocket Bolsón; Nombre de usuario del Autor: Estufas Rocket Bolsón; Fecha de publicación: 16/02/2020; Título del Video: Primer encendido de una estufa rocket JOTA ; URL del Video: <https://youtu.be/5TY6b4U2aOY>
- Partes de una estufa Rocket JOTA. Autor: Proyecto 26 Estufas Rocket Bolsón; Nombre de usuario del Autor: Estufas Rocket Bolsón; Fecha de publicación: 16/02/2020; Título del Video: Partes de una estufa Rocket JOTA; URL del Video: <https://youtu.be/sRHji8X-VCE>

Primeras 13 estufas Rocket JOTA8 del proyecto de El Bolson. Autor: Proyecto 26 Estufas Rocket Bolsón; Nombre de usuario del Autor: Estufas Rocket Bolsón; Fecha de publicación:15/02/2020; Título del Video: Primeras 13 estufas Rocket JOTA8 del proyecto de El Bolsón; URL del Video: <https://youtu.be/j3dKy7cSgF0>

El escudo térmico explicado. Autor: Proyecto 26 Estufas Rocket Bolsón; Nombre de usuario del Autor: Estufas Rocket Bolsón; Fecha de publicación: 23/02/2020; Título del Video: El escudo térmico explicado; URL del Video: <https://youtu.be/6vZ-cmeyutY>

CASO XIII. Parque Chaqueño Argentino: aplicaciones dendroenergéticas

Myriam Ludueña¹, Rocío Carreras¹, Vanesa Jiménez¹, María Carranza¹, Marta Gulotta¹, Arthur James Rivas^{2,3}

¹ *Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Capital, Santiago del Estero, Santiago del Estero, 4200, Argentina.*

² *Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Apartado postal 0819-07289, Panamá*

³ *Sistema Nacional de Investigación, SENACYT, Edificio 205, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá*

Resumen. La leña y el carbón vegetal, son la principal fuente energética para la cocción de alimentos y la calefacción en la mayoría de los hogares rurales argentinos. El Parque Chaqueño tiene trayectoria en el uso y producción de dendroenergía proveniente de sus bosques nativos. En la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, se desarrollaron experiencias con un Horno Metálico Transportable, denominado carbotambor, para uso familiar. Los costos de su fabricación, considerando los precios del tambor de 200 L, los tubos de hierro fundido y la mano de obra, son de \$AR 18600 (\$US 145), convirtiéndola en una tecnología accesible para pequeños productores además de ser de fácil manejo. Por otra parte, se determinó la calidad de carbón de especies nativas y exóticas implantadas, el que supera un rendimiento del 32%, con sustancias volátiles de 21,28 %, cenizas de 6,61 % y carbono fijo de 60,62 %. También se analizó el poder calorífico superior de leña y carbón de diversas especies, encontrándose valores superiores a 4300 y 6900 kcal/kg, respectivamente. En relación a la provisión de biomasa, la Facultad a través de ensayos genéticos seleccionó materiales superiores, para el eucalipto de origen australiano y para algarrobo del norte argentino, que podrían generar ganancias en plantaciones dendroenergéticas. Las experiencias descriptas en este capítulo son un aporte para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados al acceso a la energía limpia, la mitigación del cambio climático, la gestión forestal sostenible y el desarrollo de tecnologías sustentables.

*Correspondencia: Myriam Ethel Ludueña. E-mail: mel@unse.edu.ar

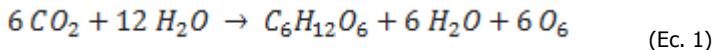
1. Introducción

1.1. Contexto

La región denominada Parque Chaqueño abarca en Argentina aproximadamente 67.495.995 ha e involucra a la totalidad de las provincias de Formosa, Chaco y Santiago del Estero y una porción de los territorios de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca, Córdoba, Santa Fe y La Rioja. Se caracteriza por ser una inmensa llanura cubierta por amplias extensiones boscosas de quebrachos, algarrobos, palmeras y pastizales (Morello y Adámoli, 1974). La región posee además una población rural distribuida de forma no homogénea con el 50% de sus habitantes por debajo del umbral de la pobreza. Esta población está constituida por criollos, migrantes de provincias limítrofes, descendientes de inmigrantes europeos y pobladores originarios de al menos cinco etnias diferentes. Los principales desafíos varían en función de la realidad de cada una de las provincias, pero las coincidencias más significativas para toda la región son: la deforestación por el avance de la frontera agropecuaria, el crecimiento poblacional, infraestructuras deficientes o inexistentes (viales, energéticas, hídricas), tenencia de la tierra, caza y captura comercial de fauna silvestre y el uso inapropiado del fuego.

En este contexto la dendroenergía desempeña un rol primordial en el funcionamiento de las residencias, instituciones e industrias rurales y periurbanas de la región, siendo la principal fuente energética para la cocción de alimentos y la calefacción en la mayoría de los hogares rurales. Se denomina dendroenergía a la energía derivada directa o indirectamente de la biomasa leñosa, que corresponde al poder calorífico neto del combustible (FAO, 2004). Comprende toda la energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos primarios y secundarios derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales. La biomasa para uso energético debe ser técnica y económicamente accesible (Broto Cartagena, 2015), siendo fundamentales estas dos condiciones. Una característica importante de la biomasa es la de ser una fuente renovable, por la capacidad de regenerarse a través del uso y manejo sustentable de los recursos.

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no tiene una contribución neta al aumento de los gases de efecto invernadero. Como se muestra en la ecuación 1 (FUNIBER, 2018) a continuación el balance de emisiones de CO₂ a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO₂ generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas.



La energía que se obtiene de la biomasa proviene de la luz solar, pues los organismos autótrofos combinan el carbono del CO₂ atmosférico con el hidrógeno del H₂O que captan del suelo. De esta reacción bioquímica se obtiene materia orgánica en forma de glúcidos -compuestos muy energéticos- y se libera oxígeno a la atmósfera (FUNIBER, 2018).

Desde el punto de vista social y ambiental, la generación de dendroenergía tiene aspectos positivos como el efecto en los equilibrios de carbono causado por la sustitución de combustibles fósiles, la generación de empleo en zonas rurales, la diversificación de la matriz energética y la menor emisión de metales pesados en la generación de energía eléctrica (FAO, 2020). Sin embargo, la biomasa se caracteriza por su baja densidad, dispersión espacial y carácter estacional, provocando la incertidumbre de su abastecimiento y, además, costos de recolección, transporte, almacenamiento y manipulación demasiado altos. Es por esto, que uno de los principales problemas de este producto es el de garantizar el suministro de la materia prima, tanto en cantidad como en calidad y precio adecuados.

En la región del Parque Chaqueño la principal fuente de dendrocombustibles es el bosque nativo. Según las estadísticas nacionales en el año 2017, el Parque Chaqueño produjo 1.095.438 toneladas métricas (t) de leña y 1.986.605 t de leña para carbón proveniente de las provincias de Chaco y Santiago del Estero principalmente. La especie nativa más utilizada para leña y carbón es el Algarrobo (*Prosopis sp.*), aunque también se aprovechan el Quebracho colorado (*Schinopsis lorentzii*) y el Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) entre otros árboles y arbustos nativos. También la dendroenergía puede producirse a partir del aprovechamiento secundario de plantaciones, mediante raleos y podas que dan origen a residuos utilizables como combustibles. En otro caso, la biomasa puede ser producida con un objetivo energético, como es el caso de una forestación dendroenergética *ad hoc*. Los cultivos forestales con fines energéticos son establecidos con especies de rápido crecimiento y capacidad de rebrote, a densidades altas y con manejos intensivos para garantizar la obtención de cantidades elevadas de biomasa. Sin embargo, también resultan sistemas altamente vulnerables a las ataques de plagas y enfermedades y pueden ocasionar impactos negativos en el ambiente y la biodiversidad. Es por ello que es necesario no solo identificar las especies adecuadas sino también las áreas potencialmente aptas para estos cultivos. En este sentido, si bien en la región no hay experiencias en forestaciones energéticas, se han estudiado especies y materiales genéticos dentro de estas especies que podrían ser cultivadas para dar respuesta a la demanda de biomasa y disminuir la presión sobre el bosque nativo. Por otra parte, se han determinado áreas que podrían ser utilizadas para este tipo de plantaciones y para las provincias de Chaco y Formosa se identificaron 1.634 ha con aptitud para el cultivo de *Eucalyptus camaldulensis* con fines dendroenergéticos (FAO, 2020).

Otra fuente de dendroenergía son los residuos de la forestoindustria. Además de la fabricación principal de productos de madera sólida, los aserraderos presentan descartes en forma de viruta, costaneros, despuntes, cortezas, entre otros, que pueden ser utilizados para la generación de energía dentro de los mismos aserraderos o para otros sectores. Según el último relevamiento censal de los aserraderos, la Región Chaqueña registra un total de 678 aserraderos que representan el 32,5% del total nacional. En el caso de las provincias de Formosa, Chaco y Santiago del Estero, si bien los subproductos generados no se cuantifican, se ha podido determinar que

alrededor de un 34 % se vende como leña para los fabricantes de carbón y el mayor porcentaje se desecha o se quema para mantener limpio el aserradero (Ministerio de Agroindustria, 2018).

En este contexto, es importante analizar los diferentes tipos de tecnologías que se utilizan en la región para la generación de energía a partir de dendrocombustibles. Según un relevamiento preliminar de la Mesa de Competitividad Foresto Industrial (2019) existen en el país 9 empresas nacionales y 4 internacionales que producen calderas de diferentes tipos y 7 fabricantes locales de estufas, salamandras y cocinas a leña. En relación a la producción de carbón la tecnología más difundida es la del horno argentino media naranja, construido en base a ladrillo y el horno metálico transportable que es comercializado por una empresa de la región o construido artesanalmente mediante tachos de 200 litros. En el presente trabajo se describen resultados de experiencias con el horno metálico el cual es difundido por el Estado Nacional en poblaciones rurales con el objetivo de mejorar la calidad del carbón obtenido entre otros beneficios.

Finalmente y en base a lo antes expuesto, es necesario analizar las aplicaciones dendroenergéticas del Parque Chaqueño en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU, 2019). Para el cumplimiento de los mismos, se han establecido metas para el 2030 vinculadas a garantizar la energía asequible, sostenible, segura y moderna para todos, adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos y gestionar sosteniblemente los bosques entre otras. En vínculo con estos ODS, el noroeste y noreste de Argentina tienen el menor índice de cobertura eléctrica y no disponen de gas natural por red, principalmente en las poblaciones localizadas en áreas rurales aisladas y difícil acceso (Rabinovich, 2013). La dendroenergía es una de las fuentes de energía renovable que puede asegurar el camino a las personas que no tienen acceso a ella y particularmente en la región Chaqueña existen grandes volúmenes de biomasa sin aprovechar proveniente de los subproductos de la foresto industria y los residuos de plantaciones forestales. A esto se suma el potencial de manejo sustentable del bosque nativo que permitiría actualmente obtener más de 9 millones de t/año (Mesa de Competitividad Foresto Industrial, 2019).

1.2. Propósito u objetivo del capítulo

La Cátedras de Energía de Biomasa y la de Mejoramiento Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero (FCF-UNSE), han desarrollado experiencias vinculadas al uso de dendroenergía. A través de distintos proyectos de investigación han avanzado en la selección de árboles superiores para plantaciones dendroenergéticas y la caracterización química y energética de especies nativas y exóticas adaptadas a la región Parque Chaqueño. Por otra parte ha implementado metodologías innovadoras para la producción sustentable de carbón vegetal a escala familiar. En este marco, se detallan los objetivos de la presente publicación:

-
- Difundir las innovaciones técnicas y experiencias de producción dendroenergética generadas por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina), con perspectivas de aplicación para la Región Chaqueña.
 - Contribuir a alcanzar las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculadas a garantizar el acceso a servicios energéticos, la promoción de mecanismos eficaces en relación con el cambio climático, la gestión forestal sostenible y el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales así como su transferencia, divulgación y difusión.

2. Marco normativo, legal e institucional

Para el uso de los bosques en una forma sostenible existe el marco legal nacional argentino, amparado bajo la ley N° 26.331 (Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, 2007) denominado Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de Bosques Nativos. Allí se establece un mecanismo para que cada provincia de Argentina realice un mapeo de los bosques nacionales y establezca un Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN). La provincia de Santiago del Estero particularmente está regulada por la ley provincial N° 6841 Conservación y uso múltiple de las áreas forestales de Santiago del Estero. Estas leyes regulan el uso productivo sobre tierras o áreas forestales y establecen los límites específicos para ello. Posterior a la sanción de la ley nacional N° 26.331 promulgó su propia ley de OTBN mediante la ley N° 6942, y posteriormente el Decreto N° 3133/15. Ambas leyes (N° 6841 y N° 6942) establecen las prácticas a desarrollar, la extensión y frecuencia para la ejecución de cualquier proyecto productivo acorde a las implicancias legales. Al mismo tiempo, es obligatorio la elaboración de un estudio de impacto ambiental para proyectos de uso de los recursos naturales bajo la aplicación de la ley provincial N° 6321 "Normas generales y metodología de aplicación para la defensa, conservación y mejoramiento del ambiente y los recursos naturales" Estos estudios de impacto ambiental son aplicables para las actividades de extracción y de los procesos de industrialización asociados.

El Consejo Federal del Medio Ambiente (COFEMA) del Ministerio de Ambiente de la Nación, integrado por representantes de las provincias de Argentina, es autoridad de aplicación de la ley nacional N° 26.331 y definió los lineamientos técnicos estratégicos para la política a implementar, entre ellos menciona al manejo forestal sostenible a nivel de cuencas forestales. Con este marco legal, el gobierno regula la producción de carbón vegetal de manera controlada sin poner en riesgo los ecosistemas. Por otra parte, el Estado Nacional fomenta la instalación de plantaciones forestales con fines industriales y para enriquecimiento de bosque nativo, mediante aportes económicos no reintegrables y beneficios impositivos a través de la Ley N° 25.080 de Inversiones para Bosques Cultivados. Incluye también la posibilidad de apoyo económico para las tareas de poda, raleo y manejo de rebrotes de las plantaciones logradas. Actualmente el país cuenta con 1,37 millones de hectáreas de plantaciones forestales, con una tasa de plantación de 40.000 ha anuales. Estas plantaciones generan alrededor de 5 millones t/año de residuos provenientes de

podas, raleos y tala rasa (Mesa de Competitividad Foresto Industrial, 2019). Si se tienen en cuenta estas estadísticas y la proyección de alcanzar las 2 millones de hectáreas plantadas para el año 2030, según el compromiso firmado por la Argentina en el Acuerdo de París, es posible considerar el uso de la biomasa forestal proveniente de plantaciones como una opción de energía térmica segura y eficiente a corto y largo plazo.

Según el Plan de Desarrollo Foresto Industrial 2030 (Mesa de Competitividad Foresto Industrial, 2019) si a los residuos de las plantaciones se suma la biomasa obtenida del manejo sustentable de los bosques se podría alcanzar un volumen potencial de 16 millones de toneladas concentrado principalmente en las provincias del NEA y NOA. En la actualidad en la región Chaqueña, más del 60% de la producción de carbón vegetal se hace a escala familiar o de pequeña producción, con grupos de 1 a 3 hornos tipo media naranja. El corte de la leña se realiza usualmente con motosierra, y para la recolección y transporte de la madera se utilizan "zorras", pequeños carros de madera traccionados por animales de carga (mulas o burros), o tractores con acoplados. A partir de estos valores, se ha estimado que la producción registrada de carbón en la provincia de Santiago del Estero, es de alrededor de 100.000 t anuales y genera empleo directo y permanente para 900 personas (De Bedia y Gómez, 2020).



Figura 1. Mujer carbonera de Santiago del Estero cerrando el ingreso de oxígeno por los orificios bajos del "horno media naranja argentino". (Fuente: propia, Santiago del Estero, 2019).

El método más utilizado para la producción del carbón vegetal es el horno media naranja argentino. Esta tecnología es sustentable si los bosques de donde se obtiene la leña se aprovechan a un ritmo que no supere su capacidad de crecimiento. Se estima que una hectárea de bosque nativo produciría a perpetuidad el carbón necesario para el uso de una familia compuesta por 8 personas. Desde una perspectiva de género, la producción de carbón vegetal se asocia generalmente al hombre, sin

embargo en algunas zonas argentinas las mujeres tienen un papel predominante, siendo su actividad principal la carbonización de leña, además de las labores del hogar, tal cual lo muestra la Figura 1 (Ludueña et al., 2019).

Según Fernández Livatetz (2019) el rendimiento de estos hornos para la producción de carbón de madera blanda es de 29,14% mientras que el de maderas duras es de un 28- 29%. Otra alternativa tecnológica de producción de carbón que mejora la calidad del producto y disminuye los costos de transporte de la leña es el Horno Metálico Transportable (HMT). Este horno es distribuido en zonas rurales de la Argentina por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (MAyDS) a través del Programa Bosques Nativos y Comunidad. El mismo consiste en dos secciones cilíndricas que se encastran y una tapa cónica, con ocho conductos de entrada/salida de aire dispuestos radialmente en la base, tal cual se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Horno metálico transportable distribuido en zonas rurales de Argentina por el MAyDS de la Nación. (Fuente: Rolando Tévez, Chaco, 2021).

En el Laboratorio de Energía de Biomasa de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (FCF-UNSE), se realizaron experiencias con un Horno Metálico Transportable (H.M.T.) denominado "Carbotambor" (Ludueña *et. al.*, 2020) con maderas nativas de la Región Chaqueña y leña de plantación de Eucalipto. Sobre esta experiencia se desarrollará un apartado específico en este capítulo.

En esta misma línea de trabajo, el MAyDS, a través de la Secretaría de Política Ambiental en Recursos Naturales, también realiza la entrega de cocinas a leña para familias campesinas e indígenas localizadas en áreas de bosques nativos del Norte del país. Estas cocinas utilizan un 40 % menos de leña en comparación con el fogón abierto o tradicional en la cocción de los alimentos (Sosa et al., 2011). Además, reducen la carga de trabajo derivada de la recolección y el acarreo de leña, tarea

que suele ser realizada por mujeres. Del mismo modo, estos artefactos permiten cocinar de forma limpia y segura dentro del hogar ya que el humo es expulsado a través de una chimenea. Para la zona sur del país, en la Patagonia Argentina, el MADyDS subsidia la construcción de estufas a leña de bajo consumo. Estas estufas, comúnmente llamadas estufas rusas, son elaboradas con ladrillos refractarios y se caracterizan globalmente por tener rendimientos de entre el 84 y el 93 % (Battro, 2006).

3. Dendroenergía en la Región Chaqueña

3.1. Especies del Parque Chaqueño

En la ecorregión Parque Chaqueño, vegetan especies arbóreas y arbustivas que constituyen una fuente de biomasa muy importante para el abastecimiento dendroenergético. Vélez (2008) menciona, por orden de importancia, las especies que participan en la composición de la leña utilizada en usos domésticos en Santiago del Estero, éstas son: Algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.), Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco* Schlttdl.), Tusca (*Vachellia aroma* (Gillies ex Hook. & Arn.) Seigler & Ebinger), Garabato (*Senegalia praecox* (Griseb.) Seigler & Ebinger), Brea (*Parkinsonia praecox* (Ruiz & Pav. ex Hook.) Hawkins), Jarilla (*Larrea divaricata* Cav.), Algarrobo negro (*Prosopis nigra* (Griseb.) Hieron.), y en menor cantidad Quebracho colorado (*Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl.), Chañar (*Geoffroea decorticans* (Gillies ex Hook. & Arn.) Burkart), Mistol (*Sarcophalus mistol* (Griseb.) Hauenschild), Pino (*Pinus* sp.), Paraíso (*Melia azedarach* L.), Sacha granada y Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*).

A pesar de que se cuenta con una amplia variedad de especies disponibles, según De Bedia et al. (2016) las especies más empleadas para producción de carbón de uso doméstico son el Quebracho blanco y el Mistol, mientras que el Quebracho colorado es preferido para hacer carbón para usos industriales. En el último Inventario Nacional de Bosques Nativos (INBN2, 2020), las especies Algarrobo, Quebracho blanco y Mistol presentaron en la región un volumen de 3,34 m³/ha, 6,95 m³/ha y 1,48 m³/ha respectivamente, mientras que el Quebracho colorado alcanzó un volumen de 4,26 m³/ha. Estos datos refuerzan las investigaciones de (De Bedia et al., 2020) que indican que, con bosques en buen estado, se necesitan entre 50 y 60 hectáreas bajo manejo para producir una tonelada de carbón al mes, a perpetuidad.

Por otra parte, en las provincias de Formosa, Chaco y Santiago del Estero se localiza la mayor superficie de plantaciones con especies nativas del país, con 5.319 ha de Algarrobo blanco (UCAR, 2014). La gran mayoría de estas plantaciones se realizaron en zonas abandonadas, con suelos salinos y capa freática alta. Su rendimiento depende de la calidad del sitio, obteniéndose entre 24 a 45 m³/ha de volumen de fuste, a los 25 años de edad, con una densidad final de 80 a 150 plantas por hectárea. Otro dato interesante de estas plantaciones es que durante su desarrollo se deben ejecutar 3 ó 4 raleos y podas frecuentes ya que la especie presenta bifurcaciones desde la base y una gran capacidad para rebrotar. El primer raleo se realiza aproximadamente a los 8 años de edad, con 10 cm de diámetro y según Coronel et

al. (2014) el volumen obtenido del raleo de 83 individuos alcanzó los 5,66 m³. Estos datos indican la gran cantidad de residuos biomásicos que generan estas plantaciones y que pueden destinarse a la producción de dendroenergía. Por otro lado, es posible considerar también la implementación de plantaciones dendroenergéticas con esta especie, con altas densidades, mayor cantidad de raleos y manejo de rebrotes. Para ello será necesario determinar el material genético más adecuado para la región.

En este sentido, la FCF UNSE cuenta con un ensayo genético de Algarrobo blanco (*Prosopis alba*) donde se prueban diez orígenes diferentes de la especie (López, 2005). Los materiales provenientes de Salta, Formosa y Chaco presentaron en promedio entre 3 y 5 fustes, comprobándose además que este carácter está asociado genéticamente al crecimiento en altura y es hereditario (Carreras et al. 2016). En base a estos resultados, se podría aseverar que las plantaciones realizadas a partir de semilla seleccionada para estos rasgos generarían altas ganancias en la producción de biomasa. Entre las especies exóticas mencionadas, se destaca el *Eucalyptus camaldulensis* o Eucalipto colorado, del que existen aproximadamente 400 ha plantadas en Santiago del Estero. Según el documento técnico de la FAO (2020) donde se evalúa el potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina, el *E. camaldulensis*, podría utilizarse con estos fines en Formosa y Chaco, en sitios de calidad media a baja, con una densidad de plantación de 1.111 plantas/ha y un ciclo productivo de 24 años (tres ciclos de corta cada ocho años), con un rendimiento de 86 t/ha de biomasa seca.

Por otra parte, según los datos obtenidos del ensayo genético establecido por FCF, UNSE (López, 2005) existe material genético que presenta una buena adaptación a la Región Chaqueña, con un desarrollo superior al de las especies nativas. La procedencia más estable es Gibb River, Australia con un incremento promedio en volumen a los 8 años de edad es de 16,1 m³/ha/año. Para emprendimientos productivos de pequeña y mediana envergadura, López (2005) recomienda utilizar el material del huerto semillero de Zimbabwe que tiene un desempeño en volumen de 27,1 m³/ha/año a pesar de su moderada adaptación general.

3.2. Biomasa forestal residual

La selección de la fuente y del recurso energético para minimizar el impacto ambiental al cambio climático implica armonizar las potencialidades con las necesidades energéticas y la menor afectación al ambiente (Quintero, 2021). Por esta razón tiene importancia definir el origen de la biomasa con fines energéticos y su consumo, producción y transformación. Esta biomasa puede provenir de bosques nativos o implantados.

Los bosques nativos son aquellos constituidos por árboles autóctonos que han evolucionado y se han reproducido naturalmente adaptándose a la zona conformando un ecosistema con gran biodiversidad de especies. Los bosques implantados o cultivados son aquellos que fueron instalados por el ser humano con especies forestales

nativas o exóticas y, generalmente, son monoespecíficas (Pérez Sosto, 2003). Como biomasa forestal residual puede incluirse el residuo que queda de la poda de frutales y podas urbanas, de las tareas de limpieza, de manejo sanitario y de extracción de ejemplares en bosques. A este tipo de biomasa forestal suele llamarse biomasa forestal primaria. También se denomina biomasa forestal a la que tiene su origen como residuo de la industria forestal, es decir la corteza y parte de madera que se quita a las trozas para su dimensionamiento (costaneros), los pedazos pequeños o chips de madera resultantes de malos cortes y el aserrín proveniente de todos los cortes, lijadas y cepilladas de maderas y tablas en los aserraderos.

Biomasa residual de monte nativo

Según FAO (2017) la biomasa forestal derivada del monte natural se la llama "leña de monte" y consiste en trozos de madera de 0,18 m de diámetro y de 0,70 a 1,00 m de largo, como así también ramas, muñones, raíces, etc (Figura 3).

Leña campana se denomina a la biomasa forestal de monte natural duraminizada. Las trozas de madera de especies con mayor madurez y envejecimiento sufren una transformación química en las células parenquimáticas que le confieren mayor resistencia al ingreso de agentes xilófagos (Vignote Peña et al., 2013).



Figura 3. Leña de monte: a. Algarrobo negro. b. Chañar y tusca (Fuente: propia, Santiago del Estero, 2021).

Biomasa residual de bosque implantado

La biomasa forestal de bosque implantado o cultivado es la obtenida de árboles que han sido plantados o sembrados por el ser humano y generalmente tiene como finalidad el uso en la industria. En Argentina existen plantaciones forestales con fines dendroenergéticos desde el año 1930 realizadas con *E. camaldulensis* y otras especies para abastecer de leña a secaderos yerbateros y de té en la zona del Noreste. Luego, en el año 1947, se forestó vastos eucaliptares que cubrieron 10.000 ha en zona de la provincia de Jujuy con el objetivo de refinar con este carbón de leña, el hierro de los hornos instalados allí (Cozzo, 2007).

En el bosque implantado o cultivado se encuentra como biomasa forestal al residuo proveniente de los tratamientos silviculturales como la poda y el raleo. El término poda se usa con frecuencia a la actividad de desrame (escamondo) donde se extrae totalmente la rama desde su nivel de exteriorización en la corteza del árbol. Se realiza en forma selectiva quitando ramas que entorpecen el crecimiento en diámetro del árbol o se realiza para protección ante agentes fitosanitarios nocivos. El raleo es una tarea silvicultural selectiva que consiste en la extracción de árboles de corta edad y pequeños diámetros para que otros continúen su crecimiento, debe ser considerada una delicada herramienta en la mejora productiva del bosque.

En la actualidad, muchos de los bosques implantados están siendo pensados para contribuir de una forma más efectiva con los cuidados del ambiente. Un ejemplo es la biorrefinería forestal pues es una estructura que integra procesos de producción de combustible y productos químicos a partir de la biomasa, valorizando los residuos forestales y utilizando todas las partes del árbol. Esto es una industria integrada con el uso eficiente del potencial total de la materia prima y procesos del sector forestal, para conferir valor añadido a sus productos y residuos, por cooperación dentro y entre las cadenas de valor (Area, 2019). A partir de la plataforma termoquímica de la biomasa se puede obtener por pirólisis el carbón vegetal, como subproducto de los bosques implantados.

Biomasa residual de la industria maderera

La industria maderera genera una gran cantidad de residuos con potencial de aprovechamiento en su totalidad.

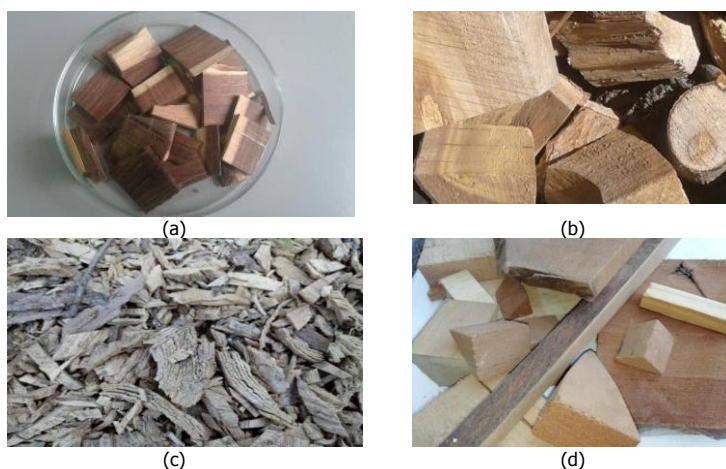


Figura 4. a. Astillas de madera de Garabato. b. Recortes de madera de Aguaribay (*Schinus areira L.*).c. Recortes de Tala (*Celtis tala Gillies ex Planch.*). d. Recortes de maderas. (Fuente: Myriam Ludueña y Vanesa Jiménez, Santiago del Estero, 2019).

La Asociación Forestal Argentina (2012) estima que de un 46 % de la madera que genera un árbol para el aserrado en tablas sólo se utiliza un 20 % y el resto se desecha para energía en forma de corteza, viruta y aserrín. La biomasa de la industria maderera comprende la fracción biodegradable de los residuos de la industria del mueble (aserrín derivado del lijado de tablas o cortes, virutas originadas en el cepillado de tablas o maderas, restos de tableros y chapas de madera, recortes), En la Figura 4 se pueden observar diferentes tipos de astillas de especies nativas de la región y recortes de madera de carpinterías y aserraderos de la zona con alta variedad de tamaños.

En aserraderos, los residuos biomásicos del aserrío son los costaneros (trozos de madera con corteza), las virutas del corte de los troncos, astillas del tableado, aserrín del material fino que desprende la madera cuando se corta, y las cortezas de diferentes especies como se ven en la Figura 5.

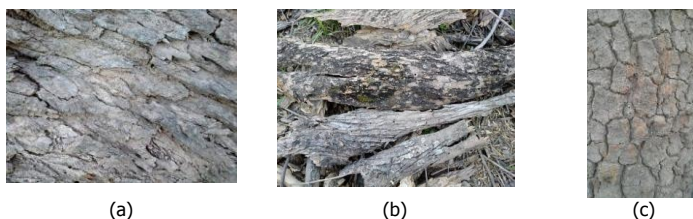


Figura 5. a) Corteza de Tala en árbol vivo; b) corteza de Tala desprendida del árbol y c) Corteza de Quebracho blanco. (Fuente: propia, Santiago del Estero, 2020).

Biomasa procesada: carbón vegetal

El producto obtenido de la combustión de biomasa forestal residual (bajo condiciones controladas de temperatura y oxígeno) se denomina carbón vegetal. Es el resultado de la carbonización de la biomasa. El carbón vegetal puede ser generado por los diferentes tipos de biomasa forestal de monte nativo. La Figura 6 muestra carbones vegetales de diferentes especies de la región chaqueña que se comercializan a nivel local, regional e internacional. Se prefiere el consumo del carbón vegetal frente a la leña por algunas características físicas. La densidad, por ejemplo, es una característica muy importante, para su comercialización, a igualdad de peso y a mayor densidad, mayor energía y mayor facilidad y reducción de costes de transporte.

Una de las ventajas del carbón vegetal como combustible, frente a la madera, es que el carbón vegetal aumenta muy poco su humedad con el tiempo, mientras que la madera es muy higroscópica y su poder calorífico desciende con la humedad (Kollmann, 1959). Otra ventaja del carbón vegetal es que el poder calorífico es mayor que el poder calorífico de la madera que le dio origen. Según Kollmann (1959) en los carbones desciende la proporción de hidrógeno y oxígeno con el grado de desgasificación mientras que aumenta la de carbono provocando el aumento del poder calorífico. Esto mismo causa una baja generación de humo del carbón vegetal

consumido. Es altamente resistente a la descomposición biológica, moderadamente friable y su uso es directo sin ningún pretratamiento.

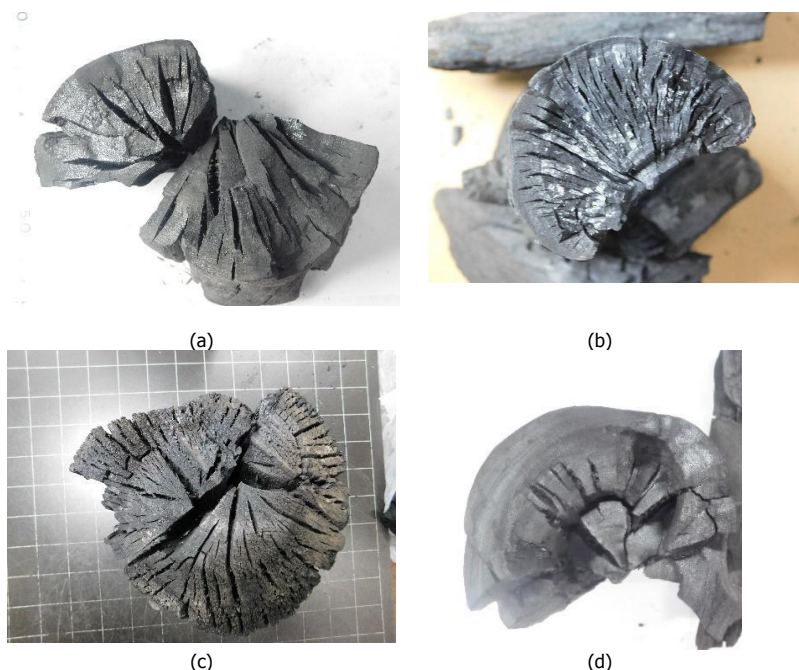


Figura 6. Carbón vegetal de especies nativas. a. Algarrobo blanco. b. Tusca. c. Quebracho colorado. d. Quebracho blanco. (Fuente: Federico Calatayú, Santiago del Estero, 2019).

3.3. Características de la biomasa forestal residual

La biomasa forestal residual ya mencionada previamente puede presentar, en términos generales, características como las que se mencionan:

- Es *neutra* con respecto a emisiones de carbono, aún cuando se consuman combustibles fósiles en su cosecha y transporte, siempre que se genere y emplee en forma sostenible.
- Es *renovable* respecto a los recursos que se consume, si son reemplazados generando una cantidad equivalente.
- A pesar de su menor densidad energética con respecto a los combustibles fósiles, su *competitividad actual* mejoró significativamente.

-
- Los procesos de conversión energética de biomasa deben *ubicarse próximos* a sus fuentes de obtención minimizando las distancias de transporte y sus costos asociados, se recomienda < 100 km.
 - Permite utilizar *residuos lignocelulósicos* (madera, aserrín, carbonilla, etc.) dándole una utilidad, permitiendo el reciclaje y disminución de residuos.
 - *No emite contaminantes* sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas
 - *Disminuye la dependencia externa* del abastecimiento de combustibles.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la biomasa forestal posee características internas y externas que, en algunos casos, requiere de pretratamientos o transformaciones para un aprovechamiento energético eficiente. El gran y diferente tamaño de sus piezas (granulometría), heterogeneidad y poca uniformidad, los diferentes contenidos de humedad, la reducida densidad, la gran dispersión de los residuos y la dificultad del transporte y manipuleo son esas características que deben controlarse para un resultado eficaz.

Los principales parámetros que caracterizan la biomasa para evaluar su capacidad y facilidad para ser utilizada con fines energéticos son los siguientes:

-Composición química y física. Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. La madera es un material orgánico que se compone de tres elementos principales carbono (50 %), oxígeno (43 %) e hidrógeno. Estos elementos forman macromoléculas (biopolímeros) que son los componentes principales de la pared de las fibras y son los principales constituyentes de las especies fibrosas madereras y no madereras: celulosa, hemicelulosas y lignina. También se encuentran presentes otros compuestos en menor proporción extractivos y cenizas (Vallejos, 2020). El análisis de los compuestos de la maderamuestra la presencia de celulosa (45 %), hemicelulosas (30 %), lignina (20 %) y extractivos (3 %), para latifoliadas y celulosa (42 %), hemicelulosas (27 %), lignina (28 %) y extractivos (5 %) para coníferas. Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

-Densidad aparente. La densidad aparente se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

-Granulometría. La granulometría proporciona las fracciones en peso de cada dimensión característica que compone la biomasa.

-Contenido de humedad (H.R.). El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Esto se debe a que los residuos salen del

proceso productivo con un contenido de humedad muy alto. Se deben implementar operaciones de acondicionamiento antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

-Porcentaje de cenizas. El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición. En algunos casos esta ceniza puede ser utilizada. Tal es el caso de la ceniza de la cascarilla de arroz debido a que es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

-Poder calorífico. Todas las formas de biomasa tienen poder calorífico, el cual se expresa como la cantidad de energía por unidad de masa de la sustancia; por ejemplo, joule por kilogramo o kilocalorías por kilogramo. Esta es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. El contenido calorífico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. El poder calorífico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la conversión termoquímica del material. El poder calorífico se puede considerar de dos formas: bruto y neto o poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). El PCS se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por la masa. El PCI es la cantidad de energía disponible descontando el calor latente de vaporización del agua en los productos de la reacción; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable, y siempre es menor que el PCS.

Como referencia, se realizó en el Laboratorio de Energía de Biomasa, del Instituto de Tecnología de la Madera, dependiente de la FCF-UNSE, la determinación del PCS de varias especies utilizando la bomba calorimétrica semiautomática marca *Julius Peters* GMBH, fabricado en Berlín, Alemania, en 1983. Esto se realizó a un determinado porcentaje de humedad y en condiciones adiabáticas según Norma DIN 51900 (2003). La metodología de análisis se presenta en la literatura (Ludueña et. al., 2020). La transformación de leña en carbón vegetal permite el incremento del PCS, tal cual lo demuestran los valores de Tabla 1 para la madera de mistol (4708,33 kcal/kg) y luego el carbón vegetal de la misma especie vegetal arbórea (6946,67 kcal/kg). Asimismo, se muestran valores de PCS de diferentes combustibles.

Tabla 1. Poder calorífico superior (kcal/kg) de especies nativas y cultivadas de la Región Chaqueña

Combustible	n	Media	D.E
Madera de Algarrobo Blanco (<i>Prosopis alba</i>)	3	4616,67	28,87
Madera de Ancoche (<i>Valesia glabra</i>)	3	4386,33	44,43
Madera de Brea (<i>Cercidium praecox</i>)	3	4258,33	54,68

Madera de Cebil (<i>Anadenanthera colubrina</i>)	3	4796,33	83,74
Ramas Chalchal (<i>Allophylus edulis</i>)	3	4364,67	74,14
Madera de Chañar (<i>Geoffroea decorticans</i>)	3	4303,67	80
Madera de Eucalipto (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>)	31	4824,1	113,52
Madera de Garabato Blanco (<i>Senegalia gilliesii</i>)	3	4397,67	545,08
Madera de Garabato Negro (<i>Senegalia praecox</i>)	3	4398,67	85,56
Madera de Guayacán (<i>Libidibia paraguayensis</i>)	3	4576,67	86,15
Jume (<i>Suaeda divaricata</i>)	3	4509,67	17,93
Marlo de Maíz (<i>Zea mays</i>)	3	4760,33	229,27
Madera de Mistol (<i>Sarcomphalus mistol</i>)	3	4708,33	64,53
Mora Turca (<i>Broussonetiapapyrifera</i>)	3	4351,67	129,84
Madera de Palo Santo (<i>Bulnesiasarmiento</i>)	3	5010	113,33
Paraíso (<i>Meliaazedarach</i>)	3	4844,33	93,75
Madera de Quebracho Blanco (<i>Aspidosperma quebracho blanco</i>)	3	4696,67	67,34
Madera de Quebracho Colorado santiagueño (<i>Schinopsis lorentzii</i>)	3	4551,67	52,52
Tala (<i>Celtis ehrenbergiana</i>)	3	4760	270,57
Tusca (<i>Vachellia aroma</i>)	3	4194,67	163,07
Carbón Mezcla (mistol, quebracho blanco, y quebracho colorado)	3	7033,33	665,83
Carbón de Mistol (<i>Sarcomphalus mistol</i>)	3	6946,67	426,65

Fuente: Elaboración propia en base a datos de ensayos realizados en el Laboratorio de Energía de Biomasa, ITM, UNSE.

4. Estudio de caso. El uso de la energía de biomasa en el caso especial del CARBOTAMBOR

Una tecnología alternativa para la fabricación de carbón a pequeña escala, son los hornos de tipo metálicos de cilindros portátiles, los que presentan la ventaja de ser transportados fácilmente al lugar en el que se encuentra la materia prima. Sin embargo, los usuarios de los sistemas artesanales de carbonización pueden hacer un

buen o mal uso o no aceptarlos por razones culturales, por problemas coyunturales de mercado o por razones técnicas (Vélez, S., 2008).

El Horno Metálico Transportable (H.M.T.), denominado "Carbotambor" produce carbón vegetal de calidad (60,2 a 73% C.F.) y tiene un rendimiento comparable al alcanzado por el del horno Media Naranja (Ludueña et al., 2020). Además de ser fabricado con materiales 100% reciclables, ofrece las ventajas de movilidad, enfriamiento más rápido, presentar un proceso más fácil de controlar y requerir un menor consumo de energía de biomasa (Figura 7).

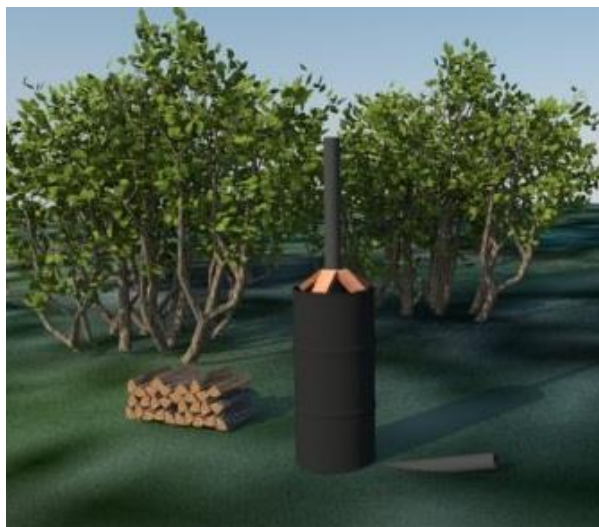


Figura 7. Carbotambor: horno metálico transportable (HMT). (Fuente: elaboración propia, 2021).

El mencionado HMT se construye con un tacho de 200 litros de capacidad, tubos de hierro, fibrocemento o galvanizado, tierra y como accesorio, algunos ladrillos o piedras. En la Figura 8 se puede apreciar las partes del mismo.

El carbón vegetal es un combustible sólido, color negro, de mayor poder calorífico que la madera y se obtiene por combustión bajo condiciones controladas de temperatura y oxígeno. Es decir según la FAO (1983) la madera debe ser calentada hasta llegar a los 100 °C donde el contenido de humedad es cero. Luego se aumenta la temperatura en el horno hasta los 280 °C donde la energía en estas etapas proviene de la combustión parcial de la madera cargada y es una reacción endotérmica. Cuando la madera supera los 280 °C comienza a fraccionarse en forma espontánea transformándose en carbón vegetal más vapor de agua y compuestos químicos en

forma de alquitranes y gases no condensables (hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono).

El ingreso de aire al horno se realiza en forma controlada, de esta forma el oxígeno quema parte de la madera. Esta etapa del proceso libera energía por lo que es una reacción exotérmica. Este fraccionamiento espontáneo se produce hasta que sólo queda carbón vegetal alrededor de los 400 °C.

Detalles constructivos

El tamaño de la leña que se utiliza en el carbotambor debe ser de un diámetro de 5 a 7 cm y de largos menores a 70 cm (Figura 8.1).

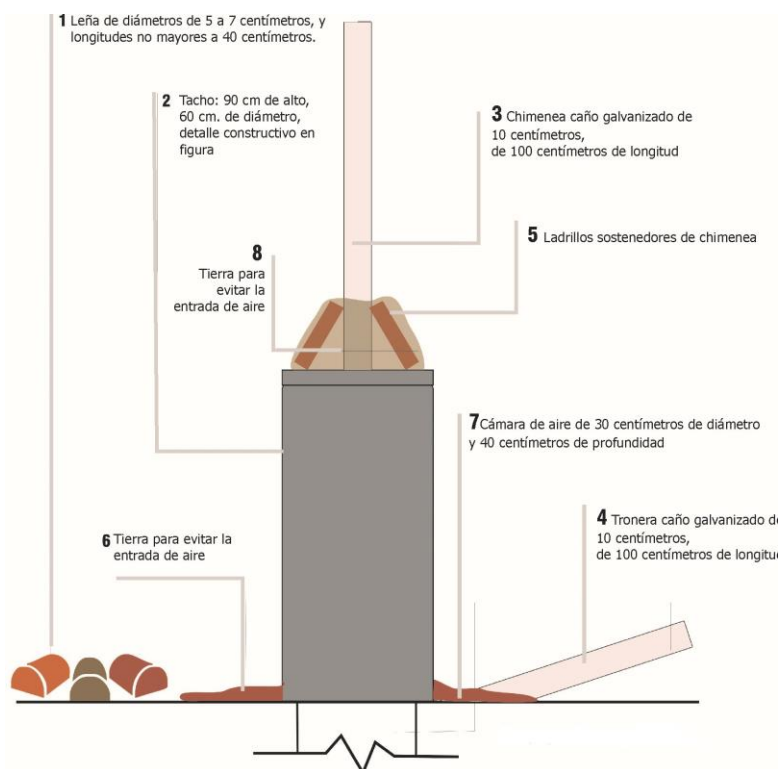


Figura 8. Carbotambor: horno metálico transportable (HTM) (Fuente: elaboración propia, 2021).

Puede usarse leña de largos menores o mayores, debiendo realizar ajustes en el tiempo de pirólisis. El tacho es de 90 cm de alto por 60 cm de diámetro y puede utilizarse los tambores de descarte para transporte de líquidos (Figura 8.2). La chimenea es un caño galvanizado, de hierro fundido o fibrocemento (según se disponga) de 9 cm de diámetro por 100 cm de largo (Figura 8.3). La tronera es un caño de idénticas dimensiones que la chimenea, es decir, caño galvanizado, de hierro fundido o fibrocemento de 9 cm de diámetro por 100 cm de largo (Figura 8.4). Para sostener la chimenea por arriba de la tapa seccionada en el centro con un orificio de 9 cm de ancho se usan cualquier tipo de ladrillos del lugar (Figura 8.5). Para evitar el ingreso de aire por la base del horno se deposita tierra alrededor del mismo (Figura 8.6). Bajo la tierra, donde se asienta el carbotambor se cava un pozo en la tierra que será la cámara de aire con 30 cm de profundidad y 40 cm de diámetro (Figura 8.7). Finalmente, para evitar el ingreso de aire se cubre con tierra los ladrillos sostenedores de la chimenea (Figura 8.8)

Preparación de materia prima

En la primera fase, se utilizan ramas de Algarrobo blanco, Tusca, Algarrobo negro, o cualquier árbol que se encuentre disponible. Se cortan trozos de diámetros no menores a 5 - 7 cm y no mayores a 40 cm de largo, utilizando machetes y hachas. El horno se construye con un tambor de chapa de 200 litros de capacidad dispuesto verticalmente, en el cual se perfora un agujero de 9 cm de diámetro en la base y otro en la tapa del mismo diámetro. La tapa se puede quitar y poner según la tarea a realizar (Figura 9).

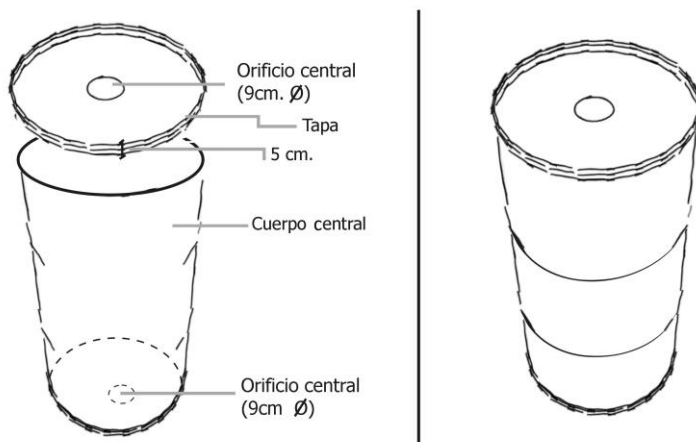


Figura 9. Adaptación de tacho de 200 l a hornometalco transportable. (Fuente: elaboración propia, 2021).

Preparación del lugar de instalación del horno

En la segunda fase, se despeja el terreno donde se ubicará el horno metálico transportable (H.M.T.), cuidando que el área estuviese bien drenada y nivelada, y disponiendo de barro para sellar las filtraciones de aire que se producirán durante el proceso. Se construye una cámara de aire circular, cavando aproximadamente 40 cm de diámetro por 30 cm de profundidad. El horno (tacho de 200 l) debe ser colocado sobre la cámara de aire. En la Figura 10, se muestra la fotografía in situ del pozo de 40 cm de diámetro x 30 cm de profundidad.



Figura 10. Fotografía *in situ* del pozo de 40 cm de diámetro x 30 cm de profundidad (Fuente: propia, Santiago del Estero, 2019).

Construcción del horno

En la cámara de aire circular se colocará un tubo de hierro o fibrocemento de aproximadamente 9 cm de diámetro, el cual tendrá una inclinación de 30°. Este tubo denominado "tronera", cumplirá la tarea de dejar ingresar el aire hacia la cámara (Figura 11).

Posteriormente, se colocará el horno metálico transportable con el orificio realizado en la base del mismo para el ingreso del aire proveniente de la cámara de aire.

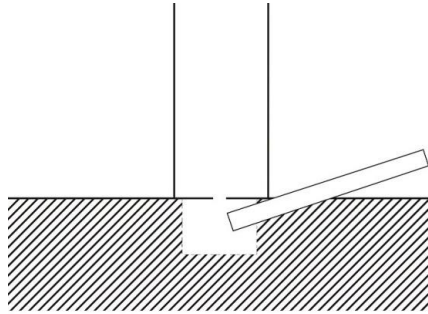


Figura 11. Puesta a punto: Ubicación del tacho de 200 l sobre cámara de aire (Fuente: elaboración propia, 2021).

Descripción del proceso de carbonización

Carga del horno

Se carga leña alternando una zona vertical y otra horizontal, favoreciendo una transferencia de aire adecuada, lo que no ocurre colocando toda la carga en forma vertical, por producirse canales de preferencia de paso de los gases, pudiendo provocar algunas zonas con "tizones" o trozos parcialmente carbonizados, debido a que las temperaturas, habitualmente más bajas en esa zona, impiden la carbonización uniforme a una velocidad media (U.S. Department of Agriculture Forest Service, 1965). En las Figuras 12 y 13 se observa la carga del horno con leña y la orientación de la leña dentro del carbotambor, respectivamente.

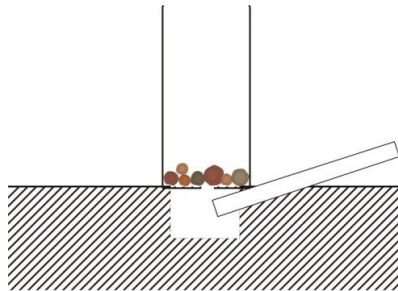


Figura 12. Puesta a punto: Carga del horno con leña (Fuente: elaboración propia, 2021).

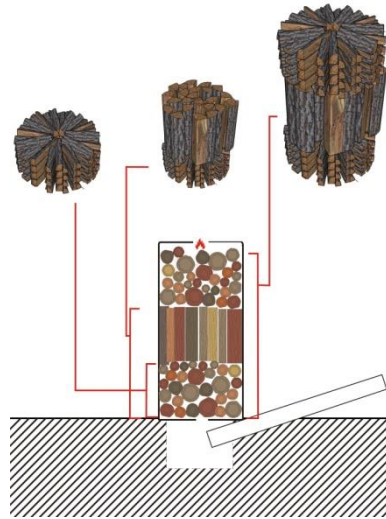


Figura 13. Puesta a punto: Vista de la orientación de la leña dentro del carbotambor (Fuente: elaboración propia, 2021).

Encendido

Se enciende el horno colocando chamizas (pasto seco) en la parte central de la carga, con ayuda de fósforos o similar (Figura 14). Una vez que el fuego es considerable en la parte superior de la carga, se coloca la tapa, y encima de ella se coloca y ajusta la chimenea. En este paso se debe tener especial cuidado debido a que el sistema incrementa su temperatura y podría representar un riesgo de quemadura para el operario, por este motivo se deberán utilizar guantes apropiados. Si la chimenea no pudiera sostenerse sola se debe recurrir al uso de un apoyo auxiliar, como por ejemplo ladrillos, que se colocan arriba de la tapa ajustándola. Se sella la junta de la tapa y el horno, y alguna otra filtración de aire, con barro.

Esta operación obliga al aire a introducirse por la tronera, circular por el horno y salir por la chimenea. Después de producida una primera zona superficial de leña seca, el aumento de calor carboniza progresivamente toda la carga. Por lo general, se encuentran, en el suelo cerca del horno, algunos "tizones" o trozos parcialmente carbonizados, debido a que las temperaturas, habitualmente más bajas en esa zona, impiden la carbonización uniforme a una velocidad media.

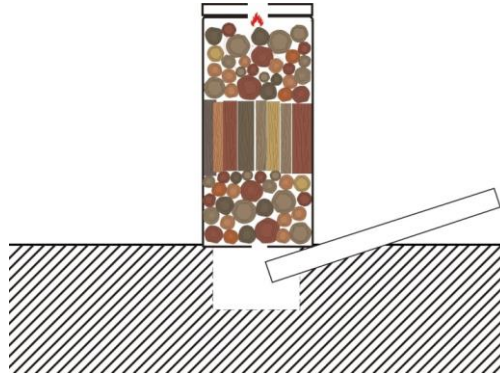


Figura 14 Puesta a punto, paso 5: Encendido del carbotambor (Fuente: elaboración propia, 2021).

Proceso de transformación de madera en carbón vegetal

El proceso es espontáneo gracias a las reacciones exotérmicas que ocurren por la conversión termoquímica, resultando en la obtención de carbón vegetal como producto.

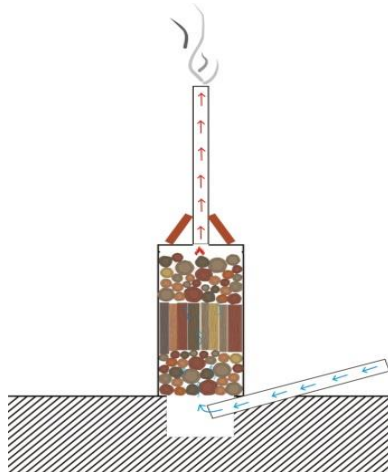


Figura 15. Horno de carbón: puesta a punto. Carbotambor en pleno funcionamiento (Fuente: elaboración propia, 2021).

El vapor de agua y los gases combustibles que se producen por la limitada cantidad de oxígeno que ingresa, escapan por la chimenea del horno (Figura 15). Para reducir

la contaminación ambiental se implementará un sistema donde se quemarán los gases con una antorcha. Por esta razón el proceso de carbonización se llevará a cabo alejado de hogares o de lugares concurridos por personas y animales. Es importante destacar que, de manera similar a procesos de carbonización similares, estos gases podrían ser utilizados para generar calor a través de su combustión en calderas, o implementados para la generación de electricidad de motores de combustión interna (James et al., 2017). La utilización de estos gases dependerá de la composición química de los gases resultantes.

Control de la carbonización

El control del proceso es importante, ya que durante el mismo pueden presentarse problemas, como que un fuerte viento desequilibre el perfil de temperatura a través del horno. Si el ingreso de oxígeno es mayor al requerido por el proceso, la biomasa puede incendiarse o influir en mayor medida sobre una parte de ella. Cuando el carbotambor toma temperatura hasta la mitad (esta operación se realiza con una termocupla), se procede a reducir el flujo de aire a través de la tronera obstaculizando el ingreso con un ladrillo hasta que el frente de pirólisis llegue a la base. Esto sucede luego de haber transcurrido entre 5 a 7 horas de encendido. En ese momento se debe finalizar el proceso.

Finalización

La carbonización concluye cuando se obstruye totalmente el ingreso del flujo de aire con un ladrillo y barro, verificando que no queden fisuras por donde haya pérdida de humos (Figura 16). El rendimiento del carbotambor supera el 32 % y los valores promedio porcentuales de cenizas son de 6,61 %, de volátiles son de 21,28 % y el carbono fijo es 60,62 %.



Figura 16. Fotografía de sellado de tronera. (Fuente: propia, Santiago del Estero, 2019).

Enfriado

El horno se deja enfriar hasta el día siguiente para que alcance temperatura ambiente (entre 12 a 14 horas). Esta operación tiene gran significancia debido a que si el carbón vegetal obtenido está caliente puede producirse espontáneamente la autoignición quemándose completamente la carga. Es necesario una correcta ventilación del ambiente donde se realiza el proceso debido al monóxido de carbono producido durante la pirólisis. Como se plantea en FAO (1983) la obtención de carbón vegetal es una actividad de gran capacidad, paciencia, experiencia y prontitud en seguir métodos de trabajo correctos, en todo momento.

Descarga y clasificación del producto

El horno se abre cuando se verifica al tacto que en toda su extensión está frío. La descarga del horno es rápida, realizando esta actividad con una zaranda para clasificar el producto en forma manual, por diferencia de tamaño.

Costo de construcción

En relación a los costos de fabricación del H. M. T. tipo carbotambor, se requiere una pequeña inversión en la adquisición de un tacho de 200 litros de capacidad cuyo costo aproximado es de \$ARS 3000. Será necesario adquirir 2 (dos) tubos de hierro fundido o similar de 1 (un) metro de longitud por 9 cm de diámetro (\$ARS 9000). Finalmente, será necesario usar pala (\$ARS 1400), balde (\$ARS 200) y algún machete para cortar la leña cuando se acomoda en el horno. El costo total aproximado del carbotambor es de \$ARS 18600. En la Tabla 2 se estiman los costos y la conversión a dólares.

Tabla 2. Estimación de costos para la fabricación de un carbotambor de 200 l de capacidad, y su conversión a dólares.

Insumo	Precio estimado (peso argentino)	Conversión a dólar estadounidense
1 tambor de 200 litros	\$ARS 3000	\$US 32
2 tubos de hierro fundido o similar	\$ARS 9000	\$US 96
1 pala	\$ARS 1400	\$US 15
1 balde	\$ARS 200	\$US 2
Total de la inversión	\$ARS 18600	\$US 145

5. Conclusiones del estudio

Las experiencias desarrolladas por la Facultad de Ciencias Forestales de Santiago del Estero vinculadas al uso del Horno Metálico Transportable, así como el desarrollo de material genético con potencial dendroenergético, pueden ser aplicadas en el resto de la Región Chaqueña contribuyendo así a la producción sostenible de dendroenergía.

La implementación de un carbonizador como el Horno Metálico Transportable es una alternativa para la producción de carbón de calidad, que contribuye a la gestión forestal sustentable del bosque nativo y proporciona a la población una fuente de energía limpia, fiable y asequible.

La Región Chaqueña tiene potencial para la producción de cultivos forestales de manera amigable con el ambiente y que contribuyan a la generación de dendroenergía. En este sentido en la Facultad de Ciencias Forestales de la UNSE se han seleccionado materiales genéticos que podrían generar altas ganancias en la producción de biomasa disminuyendo así la presión sobre el bosque nativo.

Las especies arbóreas y arbustivas del Parque Chaqueño, estudiadas en el Laboratorio de Biomasa del ITM, presentan poderes caloríficos elevados siendo una excelente opción para la sustitución de combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático.

La dendroenergía forma parte de la economía y usos tradicionales de los bosques del Parque Chaqueño, y el carbotambor es una innovación que lo convierte en una tecnología accesible y de fácil aplicación para pequeños productores, que permite optimizar su uso, producir de forma sustentable, es de bajo costo pues cualquier familia puede acceder a su construcción y contribuir a la mejora de la calidad de vida y condiciones de trabajo de la población rural y periurbana.

6. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

A partir de revisión bibliográfica y las experiencias desarrolladas en este capítulo se pueden identificar las siguientes fortalezas en relación a las aplicaciones dendroenergéticas en el Parque Chaqueño:

- Se conoce la disponibilidad y volumen de la biomasa forestal, así como la calidad energética de las principales especies utilizadas para la combustión. Esto permitirá estimar la viabilidad técnica y económica de los proyectos dendroenergéticos a desarrollarse en la región, realizando una gestión forestal sostenible. De esta forma se cumple con el ODS N° 7 "energía asequible y no contaminante" y con el ODS N° 12 "producción y consumo responsables".
- Se han identificado materiales genéticos con potencial dendroenergético de las especies más cultivadas, así como las zonas con aptitud para este tipo de cultivo lo cual permitirá orientar planes de fomento que incentiven forestaciones con fines energéticos y aseguren una provisión de biomasa de manera regular. Con este aporte se cumple con el ODS N° 15 "vida de ecosistemas terrestres" y con el ODS N° 7 "energía asequible y no contaminante".
- El HMT es una tecnología innovadora de uso doméstico que puede ser un instrumento de mejora de la producción debido a que acorta los tiempos para la obtención del producto final. Además, su sistema de gestión produce un bajo impacto ambiental, lo que contribuye a mitigar los efectos del cambio climático. Aporta de esta manera, con el ODS N° 13 "acción por el clima" y con el ODS N° 7 "energía asequible y no contaminante".

-
- La fabricación del HMT es sencilla, de bajo costo y su apropiación en las familias de pequeños productores es casi inmediata debido al fácil manejo. Estas cualidades contribuyen a garantizar el acceso universal a fuentes de energía renovables con tecnologías modernas. El aporte aquí puede verse a través del cumplimiento del ODS N° 11 "ciudades y comunidades sostenibles" y el ODS N° 7 "energía asequible y no contaminante".
 - Con la utilización de biomasa forestal se aporta a la gestión sustentable de los recursos naturales a través del ciclo neutro del dióxido de carbono sin contribución al cambio climático.

Así mismo también se pueden identificar debilidades tales como:

- A pesar de que existe una demanda de biomasa identificada existen muy pocas experiencias en plantaciones dendroenergéticas, en la región. Esto se debe probablemente a la falta de promoción específica y una opinión negativa de la sociedad sobre los impactos que pueden ocasionar los monocultivos en el ambiente.
- En la región existen superficies forestadas y una cantidad considerable de aserraderos que generan residuos que no son cuantificados correctamente y son aprovechados en un porcentaje muy bajo. Es necesario desarrollar un programa de capacitación para trabajadores vinculado al manejo y uso de estos residuos, así como inversiones en tecnologías para la incorporación de la dendroenergía al sector industrial.
- A pesar de los beneficios que presenta el H.M.T y de que es promovido por el Estado Nacional mediante líneas de financiamiento específicas, existen pocas experiencias evaluadas y no se han desarrollado aún estudios con madera obtenida de rebrotes de plantaciones forestales. Es necesario desarrollar campañas de difusión de esta tecnología, así como promover líneas de investigación que perfeccionen su diseño y uso.

Finalmente, para la producción de carbón vegetal utilizando el Horno Metálico Transportable se recomiendan las siguientes buenas prácticas:

- La leña pequeña o recortes de madera deben ser de tamaños pequeños, y relativamente homogéneos.
- La leña debe ingresar seca al H.M.T., es decir, su contenido de humedad debe estar equilibrio con el ambiente y esto se logra con 1 mes de secado al aire libre bajo techo.
- Si se dispone de chimenea de diámetro menor a 9 cm, el orificio que se perfora en la tapa debe tener el mismo tamaño que la chimenea.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la M. Sc. Feliza Benítez, docente y diseñadora de la FCF UNSE, quien desinteresadamente colaboró con la elaboración de gráficos del carbotambor. Al Téc. Ramón de Jesús Cardozo, afectuosamente "Cacho", por el trabajo en equipo en el Laboratorio de Energía de Biomasa de la FCF UNSE.

Referencias

- Asociación Forestal Argentina (2012). Bosques de cultivo. En línea 11/06/2021: [https://www.foa.org.ar/bosques_en_argentina_detalle.php?p=41].
- Area, M. C. (2019). La industria de base forestal más allá de la madera y el mueble. Revista Argentina Forestal. En línea 14/06/2021: [<https://www.argentinaforestal.com/2019/01/25/la-industria-de-base-forestal-mas-alla-de-la-madera-y-el-mueble/>].
- Broto Cartagena, M. 2015. La biomasa para uso energético como negocio sostenible. Cuaderno Técnico N.º 21. Buenos Aires. INTI.
- Carreras, R.; Bessega, C.; López, C.R.; Saidman, B.O. & Juan C. Vilardi. (2016). Developing a breeding strategy for multiple trait selection in *Prosopis alba* Griseb., a native forest species of the Chaco Region in Argentina. Journal: Forestry: An International Journal of Forest Research. Forestry (Lond) 2016 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw032>.
- Coronel de Renolfi, M.; Cardona, G.; Moglia, J. G. Gómez, A. T. (2014). Productividad y costos del raleo de algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Santiago del Estero, Argentina: Una primera aproximación. Agrociencia Uruguay, 18(2), 128-136. En línea 19/04/2021. Recuperado de: [http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482014000200014&lng=es&tlng=es].
- Cozzo, D. (2007). Silvicultura de plantaciones maderables. Edit. Orientación Gráfica. Buenos Aires. Argentina. 1080 p.
- De Bedia, G. R. y Gómez, M. F. (2020). Una mirada a la cadena de valor de la producción de carbón de madera en la Argentina. Revista Argentina Forestal. En línea 18/04/2021. Recuperado de: [<https://www.argentinaforestal.com/2020/11/19/una-mirada-a-la-cadena-de-valor-de-la-produccion-de-carbon-de-madera-en-la-argentina/>].
- De Bedia, G. R; Navall, M. y Auhad, L. (2016). Carbón Santiagueño: Características de un mercado en crecimiento. INTA, E.E.A. Santiago del Estero, C.R. Tucumán - Santiago del Estero. En línea 18/04/2021. Recuperado de: [<https://inta.gob.ar/documentos/carbon-santiagueno-caracteristicas-de-un-mercado-en-crecimiento>].
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Roma, Italia. 154 p. En línea 20/06/2021: [<http://www.fao.org/3/X5328S/X5328S05.htm#s>].
- FAO. (2004). Terminología unificada sobre la bioenergía (TUB). Terminología de los dendrocombustibles sólidos. En línea 17/04/2021: [<http://www.fao.org/3/j6439s/j6439s00.htm>].
- FAO. (2017). Curso on line "De la biomasa a la energía renovable: Dendroenergía en Argentina". En línea 07/11/2018: [<http://www.fao.org/in-action/capacitacion-politicas-publicas/cursos/ver/es/c/356808/>].
- FAO. (2020). Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 18. Buenos Aires.
- Fernández Livatetz, K. A. (2019). Comparación de rendimientos de diferentes materias primas en procesos de carbonización en la provincia del Chaco. [en

-
- línea] Consejo Profesionales de Ciencias Forestales del Chaco. 3p. En línea 21/06/2021: [<http://www.cpcfch.org.ar/descargas/trabvol002.pdf>].
- FUNIBER. (2018). Fundación Universitaria Iberoamericana. Energía de la biomasa. Págs.10-12.
- INBN2. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos. (2020). Informe Región Forestal Parque Chaqueño: primera revisión. Buenos Aires, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. En línea 21/04/2021: [<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/segundo-inventario-nacional-bosques-nativos>].
- James R., A., Yuana, W, Boyettea, M., Wangc, D. (2017). Airflow and insulation effects on simultaneous syngas and biochar production in a top-lit updraft biomass gasifier. En línea 21/06/2021: [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117309965>].
- Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Traducida por el Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias y servicio de la madera. Madrid. España. 695 págs-
- López, C. R. (2005). Mejoramiento genético en *Eucalyptus camaldulensis* y *Prosopis*. Mejores árboles para más forestadores. Secretaria de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. Diciembre 2005, Argentina. ISBN 987-9184-47-5, p. 183-194.
- Ludueña, M. E.; R. de J. Cardozo y M. E. Carranza. (2020). Utilización de hornos metálicos transportables para carbonización: carbotambor. *Quebracho* 28(1,2). En línea 23/04/2021: [<https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/v28n2a02.pdf>].
- Ludueña, M. E., Gómez, A. T., (2019). Mujeres carboneras. QUIPU Forestal N° 5. En línea 10/06/2021: [<https://colegiodeforestales.com/index.php/quipu-forestal/>].
- Mesa de Competitividad Foresto Industrial (2019). Plan Estratégico Forestal y Foresto-Industrial 2030. En línea 17/06/2021: [<https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/sycf/publicacion-forestales-11-diciembre-2019.pdf>].
- Ministerio de Agroindustria. (2018) Informe Nacional de Relevamiento Censal de Aserraderos. Año 2015. En línea 21/06/2021. [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario/_archivos/censo//000000_Informe%20Nacional%20de%20Aserraderos%202015.pdf].
- Ministerio de Justicia y Derechos Humanos (2007). Ley 26.331. Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. En línea 09/06/2021. [<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/135000-139999/136125/norma.htm>].
- Morello, J; Adámoli, J. (1974). Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco Argentino. Segunda parte: Vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. Serie fitogeográfica N° 13. 122 pp.
- Normas DIN 51.900. (2003). Pruebas de combustibles sólidos y líquidos - Determinación del valor calorífico bruto mediante el calorímetro de bomba y cálculo del valor calorífico neto. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2003.
-

-
- ONU. Organización Naciones Unidas (2019). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019. En línea 13/06/2021: [https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf].
- Pérez Sosto, G. (2003). Los bosques nativos argentinos. Un bien social. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina. En línea 15/06/2021: [http://www.igualdadycalidadcba.gov.ar/SIPEC-CBA/publicaciones/proyarboles/Bosques%20Nativos%20Argentinos.pdf].
- Quintero, Q. 2021. Cultivos energéticos. Unidad II. ReBiBiR – CYTED. En línea 15/06/2021: [https://www.youtube.com/watch?v=wmOwHOCpk2o].
- Rabinovich, G. (2013). Rápida evaluación y análisis de los objetivos del proyecto energía sustentable para todos en el sector energético de la República Argentina. Informe final. PNUD/BID. Buenos Aires. En línea 03/07/2021: [https://www.seforall.org/sites/default/files/Argentina_RAGA_ES_Released.pdf].
- Sosa, C.S.; Karol, A; RodriguezIbañez, G.Y; Aguilera, M.P. (2011) Cocina a leña de eficiencia mejorada con calentador de agua para uso doméstico. Cartilla de autoconstrucción. Ediciones INTA. IPAF Región Cuyo. En línea 21/06/2021. [https://inta.gob.ar/documentos/la-estufa-a-lena-de-alto-rendimiento].
- UCAR. Unidad para el Cambio Rural. (2014). Argentina: Plantaciones Forestales y Gestión Sostenible. Buenos Aires, Argentina, Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación. En línea 22/04/2021. [http://forestoindustria.magyp.gob.ar/archivos/gestion-forestal-sostenible/publi_ambiental.pdf].
- U.S. Department of Agriculture Forest Service, (1965).
- Vallejos, M. E. (2020). Química de Materiales Fibrosos. Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales Fibrosos. UNaM.
- Vélez, S.; M. Sarmiento; O. Pranzoni; C. Godoy; D. Castro. (2008). Consumo de biocombustible sólido en la ciudad de Santiago del Estero: Mercado no formal doméstico. Revista Quebracho N° 15 (47-53). En línea 22/04/2021. [https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/ne-a09.pdf].
- Vignote Peña, S., Martínez-Rojas, I., Villasante, A. (2013). Silvicultura y calidad de madera. En línea 16/06/2021: [https://www.researchgate.net/publication/262730301].
-

CASO XIV. Estudios experimentales sobre la generación de Syngas a partir de desechos de madera en la Patagonia chilena

Humberto Vidal^{1*}, Juan Pablo Álvarez¹, María Luisa Ojeda^{1*}, Valeria Bahamonde¹,
Juan Otero², José María Sánchez²

¹ Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile

² CIEMAT, Madrid, España

Resumen. El presente estudio, analiza la gasificación de astillas de madera de Lenga (*Nothofagus pumilio*), obtenidas como subproducto de la industria maderera en la región de Magallanes, Chile, para ser utilizada en la producción de electricidad rural. Se selecciona un gasificador de pequeña escala, con un proceso de lecho fijo y flujo tiro descendente, con una potencia eléctrica máxima de 10 kW y un proceso controlado de calentamiento, combustión, pirólisis y gasificación final controlada. El producto, es un gas sintético (gas pobre), que se alimenta a un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico. El trabajo experimental se desarrolla en cuatro etapas: pretratamiento y caracterización de las astillas; montaje e instrumentación de la unidad gasificadora; análisis de la tasa de producción y composición del gas de síntesis obtenido; y finalmente, la medición de las emisiones del motor de combustión, con el fin de evaluar las contribuciones a la atmósfera de este tipo de combustible. Los resultados indican que 1 kg de madera de Lenga, produce en promedio 1,85 m³ de gas, con una densidad de 1,02 kg/m³ y un poder calorífico inferior de 6,6 MJ/m³. Se obtienen valores para las emisiones de SO₂, dentro del rango de referencia (10-150 ppm), sin embargo, las emisiones de CO, exceden las 1500 ppm, concentración máxima de referencia, para motores a diésel. En general, los resultados y la experiencia adquirida, pueden considerarse como un prometedor paso hacia el desarrollo de la gasificación de biomasa de Lenga a pequeña escala para electrificación rural regional.

*Correspondencia: Humberto Vidal. E-mail: humberto.vidal@umag.cl

1. Introducción

1.1. Contexto

La región de Magallanes, Chile, está ubicada en la parte sur de la Patagonia, siendo la región más austral del continente americano y se caracteriza por un clima y vegetación subantártica. Como todo el país, depende en gran medida de la costosa importación de combustibles fósiles para sus procesos industriales y para satisfacer las demandas de energía térmica y eléctrica en zonas aisladas y rurales.

Esta región tiene una industria maderera bien establecida, que trabaja principalmente con una especie de madera nativa *Nothofagus pumilio*, comúnmente conocida como "Lenga". La biomasa de la madera de esta especie está ampliamente disponible en la región, tanto de los bosques gestionados como de las plantaciones y, lo que es más interesante, una gran cantidad de madera de desecho se obtiene como subproducto de su explotación y procesamiento. La región también se caracteriza por la presencia generalizada de asentamientos rurales-correspondientes a pequeños pueblos, estancias ganaderas, y viviendas aisladas, no conectados a la red eléctrica regional, ya que la baja densidad de población, y el difícil acceso y otras características geográficas territoriales, hacen que la extensión de la red regional, sea económicamente inviable.

En tales circunstancias, las aplicaciones novedosas de tecnologías de energía renovable ya establecidas, pueden proporcionar una alternativa valiosa y sostenible al uso de combustibles fósiles. La gasificación de biomasa para producir gas combustible ha recibido una atención cada vez mayor en las últimas décadas y es una de las opciones de tecnologías renovables prometedoras disponibles para muchos países, para el suministro de energía térmica y la generación de energía eléctrica (McKendry P., 2002), y el enfoque principal del presente trabajo.

Aquí se presentan los resultados de un estudio experimental sobre la gasificación de madera de residuos de Lenga obtenida como subproducto de la industria maderera en la región de Magallanes. La producción de gas sintético (syngas) a partir de la gasificación de biomasa de madera, es un proceso bien conocido y explotado en varios países para producir energía térmica y eléctrica. El estudio considera un proceso de gasificación de biomasa basado en madera local de Lenga, *Nothofagus pumilio*.

Se selecciona un gasificador de pequeña escala (o escala humana) del tipo Imbert, con un proceso de lecho fijo y corriente descendente. El gasificador tiene una potencia eléctrica máxima de 10 kW y fue ensamblado e instrumentado en el Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE) de la Universidad de Magallanes. El gasificador quema astillas de madera en una combustión controlada (pasando por pirolisis y posterior gasificación), produciendo así un gas sintético con un poder calorífico relativamente bajo (gas de síntesis o gas pobre), que luego se alimenta a un motor de combustión interna conectado a un generador de electricidad.

1.2. Objetivos del capítulo

Los principales objetivos del trabajo fueron poner en marcha y en funcionamiento el gasificador experimental de biomasa de 10 kW, determinar las condiciones necesarias para su uso en aplicaciones rurales aisladas, medir y cuantificar la tasa de consumo de biomasa, la calidad y la tasa de producción del gas de síntesis y la eficiencia general del proceso de gasificación, y finalmente analizar el tipo de emisiones liberadas al ambiente por la combustión del motor. El trabajo experimental se organiza en etapas comenzando por la caracterización de la materia prima, a través de la medición de las composiciones próximas y últimas, y su contenido energético. En segundo lugar, el gasificador se ensambla y se instrumenta para registrar los parámetros de gasificación tales como tasas de flujo, alquitrán y composición del gas. En tercer lugar, los resultados del proceso de gasificación se analizan en pruebas con diferentes configuraciones de proceso, para determinar los parámetros que describen la configuración óptima, y finalmente, se miden los gases de CO, CO₂, H₂, O₂ y SO₂ de la combustión lograda con el gas de síntesis producido, evaluado así las implicancias ambientales, de este nuevo combustible, tal como se presenta a continuación.

2. Desarrollo

2.1. Caracterización biomasa

Aproximadamente 300 kg de astillas de madera Lengua se obtuvieron de una industria maderera local. La madera se recibió en forma de astillas grandes y toscamente cortadas, con un contenido de humedad inicial de aproximadamente 16%. La madera se cortó en pedazos de aproximadamente 20-30 mm de largo, 10-15 mm de ancho y 3-5 mm de espesor, como se puede ver en la Figura 1, y se dejó secar a temperatura ambiente en instalaciones del taller del Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE) de la Universidad de Magallanes, reduciendo su humedad aún más.



Figura 1. Tamaño de las astillas de madera (Fuente: CERE-UMAG, 2014).

Las propiedades de la madera de Lengua se determinaron mediante análisis de laboratorio. Los resultados en términos de propiedades físicas y termoquímicas se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Análisis aproximado y análisis definitivo de madera de Lengua

Propiedades	Análisis Proximal	
	Base húmeda	Base seca
Tipo	Astilla	
Tamaño de viruta (cm ³)	4 (2x2x1)	4 (2x2x1)
Densidad aparente (kg/m ³)	200	
Poder Calorífico (MJ/kg)	16,89	19,55
Contenido de humedad (%)	13,61	-
Contenido de volátiles (%)	72,72	84,18
Contenido de carbono fijo (%)	13,24	15,32
Contenido de cenizas (%)	0,44	0,50
Cenizas		
Propiedades	Análisis Final	
	Base húmeda	Base seca
Tipo	Astilla	
Carbono (%)	42,54	49,25
Hidrógeno (%)	6,59	5,87
Oxígeno (%)	50,13	44,04
Nitrógeno (%)	0,08	0,1
Azufre (%)	<0.01	<0.01

Tabla 2. Poder calorífico de la madera de Lengua (en MJ/kg)

Muestra Analizada	Laboratorio	Poder Calorífico
Astillas de Lengua	Monte Alto S.A	19,46
	CENER	19,11
	CIEMAT	19,58

2.2. Configuración del gasificador de biomasa utilizado

El gasificador se ensambló en las instalaciones del CERE y una empresa maderera local proporcionó las astillas de madera de desecho de Lengua para su uso en el proceso de gasificación. Las principales partes y componentes del equipo se muestran en la Figura 2.

El gasificador experimental es del tipo semicontinuo, con una potencia eléctrica máxima de 10 kW; cuenta con un sistema de tolva de alimentación automática con rejilla giratoria y filtros ciclónicos y de lecho empacado para la recolección de cenizas y limpieza del gas de síntesis. En la Tabla 3, se muestran algunas características generales del equipo y sus componentes.



Figura 2. Descripción de partes del Gasificador de Biomasa (Fuente: CERE-UMAG, 2014, basada en información de empresa AllPowerLabs).

Tabla 3. Características del gasificador y componentes.

Componente	Características
PCU /Sist. Control	Diseño de AllPowerLabs
Motor	10 kW/Kubota 3-cyl 962cc
Generador	240VAC-50 Hz/Mecc Alte Industrial
Salida energía	3-10 kW
Peso equipo	499 kg

El equipo tiene instrumentación incorporada para controlar los parámetros operativos básicos, principalmente de presión y temperaturas; sin embargo, para fines de investigación, se agregó instrumentación adicional para permitir el monitoreo de nuevas variables operativas (Figura 3), tal como se recomienda en Janajreh I., y Al Shrah M. (2013). La instrumentación incorporada y adicional permitió monitorear las siguientes variables:

- Presión y temperatura dentro del reactor de gasificación y filtro.
- Tasa de flujo de gas pobre que ingresa al motor de combustión interna, y composición de gases (Medidor de gases Gasboard 3100 P)
- Caudal de aire que ingresa al reactor, temperatura y humedad relativa del aire (Medidor Fluke)

- Temperatura de los gases de escape del motor de combustión interna, y composición de los gases (Medidor TESTO 340).
- Frecuencia de salida de energía eléctrica, y calidad de energía eléctrica (Medidor Fluke).

Y en forma indirecta, la densidad aparente de la biomasa, la tasa de consumo de biomasa, la densidad del gas pobre, y la eficiencia del gasificador.

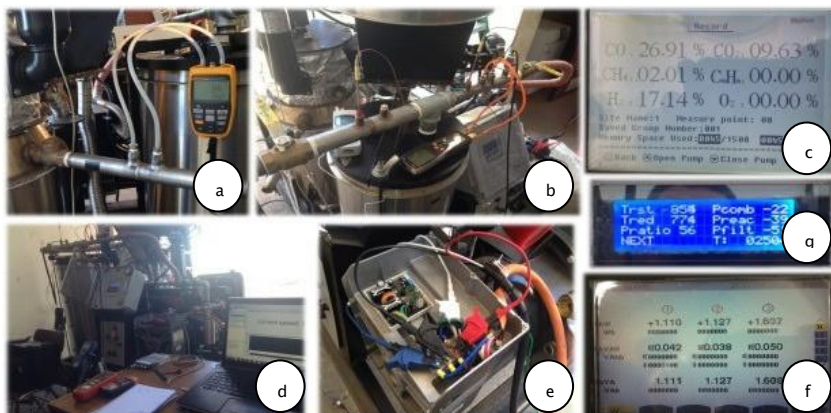


Figura 3. Instrumentación utilizada en Gasificador de Biomasa. Donde: (a) Medidor de flujo, temperatura y humedad relativa del aire; (b) y (c) Medidor de flujo y de gases para componentes de gas pobre; (d) Almacenamiento información y registro de variables; (e) y (f) Medidor de calidad de energía eléctrica; (g) Registro temperaturas y presión equipo. (Fuente: CERE-UMAG, 2014).

La temperatura dentro del gasificador se midió utilizando dos termocuplas tipo K, colocadas a diferentes alturas. La primera de ellas, lee la temperatura a aproximadamente 1/8" dentro de la sección de la garganta de la campana de reducción, llamada T_{sup} (entra por la parte superior del reactor). La segunda lee la temperatura a 1" desde el borde exterior de la base de la campana de reducción, llamada T_{inf} (entra por el fondo del reactor). La Figura 4 muestra un esquema de ubicación de las mediciones, mientras que la Figura 5, muestra la serie de tiempo de las temperaturas dentro del reactor y de los gases de escape del motor desde el arranque hasta el funcionamiento normal, llamada T_{exhaust}.

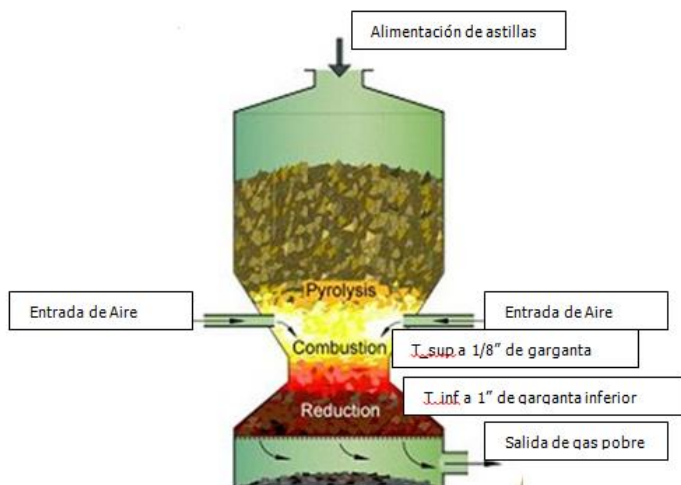


Figura 4. Esquema medición de temperaturas en gasificador.

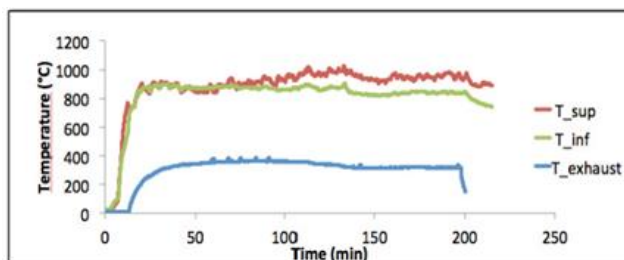


Figura 5. Temperaturas en dos lugares dentro del reactor y temperatura de los gases de escape del motor.

La Figura 6 muestra otro comportamiento interesante relacionado con la salida de energía eléctrica que muestra características de frecuencia muy estables y, por lo tanto, es adecuado para fines de iluminación.

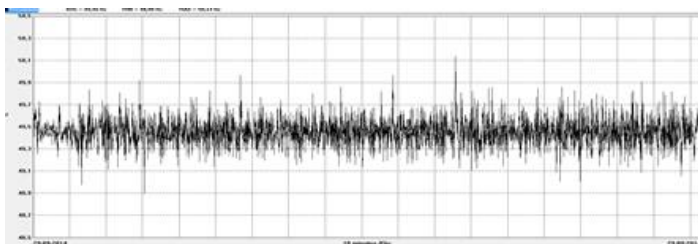


Figura 6. Frecuencia de salida de energía eléctrica, [Hz]

2.3. Proceso Experimental

El proceso comienza con la introducción de materia prima en la tolva, en este caso en formato astillas. Después de la tolva, la materia prima pasa a través de un tornillo sinfín y entra en el reactor del gasificador. Este tipo de gasificador está diseñado para utilizar el calor del gas producido para secar la materia prima entrante, a través de un primer intercambio de calor. La barrena de la alimentación, está controlada por un interruptor de nivel incorporado en la tapa del reactor. La materia prima llena el reactor y luego se seca, pasa por los procesos de pirolisis, combustión y reducción. Una vez en el reactor, tiene lugar un segundo intercambio de calor indirecto, con los gases de escape del motor que pasan a través de la unidad llamada Pyrocoil, aumentando así la eficiencia de la reacción al proporcionar más calor a la zona de pirolisis. El gas caliente sale del reactor y pasa a través de un ciclón para separar las partículas de carbón, y luego por filtro para retener impurezas, y de ahí, al sistema de impulsión de gas (ver Figura 7).

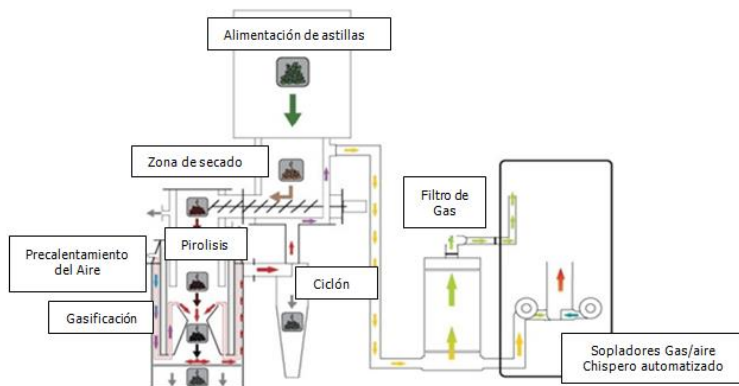


Figura 7. Esquema de funcionamiento del gasificador. (Fuente: CERE-UMAG, 2014), basado en información de empresa AllPowerLabs)

Se llevaron a cabo un total de 12 pruebas experimentales, incluida una prueba de campo en condiciones operativas realistas. Las mediciones recogidas durante las campañas experimentales permitieron estimar los siguientes parámetros de la gasificación, comprometidos como resultados de producción del proyecto desarrollado:

- Densidad aparente de las astillas de madera Lengua: 220,3 kg/m³.
- Caudal de gas de síntesis: 19,2 m³/h.
- Tasa de consumo de biomasa de astillas de madera de Lengua: 10,4 kg/h.
- Tasa de producción de gas de síntesis: 1,85 m³/kg.
- Autonomía del equipo: 6 horas con una potencia eléctrica constante de 3,3 kW.

Además, la composición del gas de síntesis producido, fue monitoreada continuamente usando un analizador de gases (Modelo Gasboard 3100P). La Tabla 4, informa la composición promedio del gas de síntesis para condiciones normales de operación y una producción de energía eléctrica de 3,3 kW. A partir del análisis de la composición del gas de síntesis, se obtiene la densidad del gas y el valor del poder calorífico inferior (PCI) como suma ponderada de la densidad de calentamiento (LHV) de sus componentes.

Se debe tener en cuenta que los parámetros de rendimiento del gasificador se obtienen como un promedio a lo largo del tiempo para el gasificador en funcionamiento normal con una potencia eléctrica constante de 3,3 kW.

Tabla 4. Descripción de los componentes del gas de síntesis, PCI y densidad derivados del gas de síntesis.

Componente	Composición (%)	PCI (KJ/m ³)
H ₂	20,20	10.788
CO	26,60	12.622
CO ₂	11,50	-
CH ₄	3,00	35.814
Valor calorífico inferior del gas pobre producido (kcal/kg)		6.610
Densidad del gas pobre producido (kg/m ³)		1,02

Nota: Ejecución de prueba el 22 de agosto de 2014.

La Tabla 5, muestra la comparación de los resultados experimentales, correspondientes a la tasa de producción del gas pobre para el presente trabajo con lo informado por los autores allí indicados. También se muestra que el valor calorífico más alto del gas se produce en el presente estudio.

Tabla 5. Comparación con algunos trabajos publicados en la literatura

Referencia	Tipo de Biomasa	PCI (MJ/m ³)	Tasa de Gas de Síntesis (m ³ /kg)
Dogru et al. (2002)	Cáscara de avellana	5,15	2,73
Zainal et al. (2002)	Madera de muebles	5,62	1,08
Sheth y otros (2009)	Madera de <i>Dalbergia sissoo</i>	6,34	1,62
Estudio actual	Madera de Lenga	6,61	1,85

Las emisiones fueron medidas utilizando un analizador de gases de 4 celdas TESTO 340, siendo las variables medidas: temperatura de gases, % de O₂, CO (ppm), CO corregido (ppm), % de CO₂, % Exceso de Aire, H₂ (ppm) y % SO₂, en la salida de los gases del motor de combustión marca Kubota DG 972 de 10 kW_e. En la Figura 8, se aprecia el proceso de medición de las emisiones, con el equipo que fue configurado con la composición del nuevo gas, obtenido de la gasificación.



Figura 8. Mediciones de gases de emisión del motor (Fuente: Foto CERE-UMAG, 2014).

Dentro de los resultados encontrados, en aproximadamente 6 mediciones realizadas durante algunos minutos de funcionamiento del gasificador y motor de combustión (Vahamonde V., 2015), se observaron valores muy altos para el CO, con relación a valores referenciales para motores de combustión que operan a diésel (principal competidor), así como una gran presencia de H₂, tal como se observa en Tabla 6, donde también se aprecia que los valores obtenidos para el SO₂, se encuentran dentro del rango de referencia. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de ajustar el proceso de combustión en el motor utilizado, para aprovechar de mejor forma el hidrógeno y el CO del gas pobre combustible.

Tabla 6. Comparación de valores de emisiones con algunos trabajos publicados en la literatura.

Referencia	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	H ₂ (ppm)	CO _M (ppm)	SO _{2M} (ppm)	H _{2M} (ppm)
Nejar N. (2007)	150 - 1.500	10- 150	--	<20.000	121-143	4.000

3. Conclusiones del estudio

Los resultados indican que la gasificación de 1 kg de astillas de madera Lengua produce 1,85 m³ de gas de síntesis, caracterizado por una densidad media de 1,02 kg/m³ y un PCI medio de 6,6 MJ/m³, condiciones que permiten aproximadamente 6 horas de autonomía en generación eléctrica en zonas rurales aisladas, es decir, el gas pobre resultante de la gasificación, se puede utilizar eficazmente en un motor de combustión interna que alimenta un generador eléctrico estacionario. La salida de energía eléctrica tiene características de frecuencia estables y, por tanto, es adecuada para fines de iluminación; por otro lado, el generador del gasificador podría no ser adecuado para aplicaciones de alimentación con grandes variaciones de cargas eléctricas, ya que esto dificulta el control de la temperatura dentro del reactor.

Los resultados obtenidos con la campaña experimental son alentadores y pueden considerarse como un primer paso hacia la aplicación de la tecnología de gasificación en zonas rurales aisladas de la región de Magallanes. Se requieren pruebas futuras que incluyan más mediciones de la temperatura dentro del reactor, para poder contar con la información requerida para alimentar un futuro modelo numérico del proceso de gasificación dentro del reactor y así optimizar variables operacionales. Otro aspecto a considerar en experiencias futuras, es la evaluación de la humedad de la biomasa y su influencia en la eficiencia del equipo, puesto que en el presente análisis la humedad de la materia prima fue menor a un 10%, situación que no ocurre a otras condiciones de almacenamiento de la materia prima.

Con relación a la concentración de los gases de escape del motor de combustión interna con gas pobre, y específicamente de monóxido de carbono, los valores estimados, sobrepasan en gran medida lo que dictan las normas de referencia, lo que implica que deben realizarse nuevos ensayos favoreciendo la conversión de CO al interior del motor. Aquí es importante mencionar, que se llevaron a cabo mediciones permanentes del CO ambiental, en las instalaciones de prueba del gasificador, y se contaba con alarma, en caso de sobrepasar valores que puedan afectar la salud de los operadores. En ensayos de terreno, el gasificador sólo se protegió de la lluvia, pero fue instalado al aire libre, para evitar acumulaciones de CO.

Otra consideración a la hora de optimizar el uso de estos equipos, sería contar con un balance energético completo, y un análisis de ciclo de vida, de forma de asegurar balances positivos de energía y bajos impactos en el medio ambiente, sobre todo en las condiciones de almacenamiento de la materia prima, y asegurar que esta sea de

origen residual, es decir, proveniente de los desechos de la explotación forestal y/o del procesamiento de la madera de Lengua.

4. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

Dentro de las principales brechas existentes para la implementación de equipos de gasificación a pequeña escala en zonas rurales y asiladas de la Patagonia chilena, se encuentra el costo promedio de dichos equipos que supera en más de 20 veces el valor de un generador eléctrico convencional con motor de combustión a diésel (alrededor de US\$ 17.000 a 20.000, según lugar final de ubicación del gasificador). El empleo masificado de estos equipos requeriría algún tipo de subvención del Estado, para lograr una rentabilidad que permitiera recuperar la inversión en un plazo razonable. Sin embargo, su ventaja comparativa, es la estabilidad de la energía eléctrica producida, y los costos de operación, sobre todo si las astillas son obtenidas en un lugar cercano a la generación, lo que sumaría a la inversión inicial el costo de una astilladora mecánica. Esto evita los costos de transporte de la materia prima para largas distancias. Otro costo importante a considerar es la de un almacenamiento óptimo de las astillas que no permita aumentar su humedad sobre el 20%, y reducir así la eficiencia del equipo.

Con relación a las materias primas recomendadas, su fabricante reconoce astillas de maderas blandas y duras, que no superen las 2 pulgadas (2,54 cm) de tamaño, como también otros materiales de la industria agroalimenticia tales como cáscaras de nueces, cáscara de coco (partida en trozos), café molido (pelletizado), aserrín (pelletizado) y mazorcas de maíz (AllPowerLabs, 2011).

La tecnología de gasificación es conocida, por la implementación de plantas pilotos a nivel nacional, y/o ensayos experimentales como los realizados con el equipo de este análisis. Sin embargo, a la fecha, todos han sido llevados a cabo por universidades o centros de investigación aplicada, sin existir todavía una comercialización de los mismos en Chile.

Se observa que el gasificador ensayado, tiene las desventajas de una alimentación en batch y además aún no posee un grado de automatización que permita que su operación sea realizada por cualquier persona, siendo necesaria una capacitación previa a quien sea el encargado de su operación y mantenimiento.

Proyectos como el desarrollado a través de programa FONDEF del CONICYT de Chile, ahora Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, o la aplicación de proyectos con instrumentos CORFO (Corporación de Fomento Productivo), permiten la difusión y la capacitación de personal que pueda utilizar este tipo de equipos. También otros instrumentos como los manejados por INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario) podrían facilitar la aplicación de estas tecnologías, para los pequeños forestales, pudiendo así dotar de energías eléctrica sostenible, a lugares apartados de los centros urbanos.

Con relación a las regulaciones, hoy en día no existe normativa vigente para regular las emisiones de fuentes fijas, asociadas a pequeños motores de combustión interna para generar electricidad, sin embargo, las metas asociadas a la mitigación del cambio climático, levantarán esto como una necesidad en el mediano plazo. Aquí debería apuntarse más que a la reducción de emisiones, a la posibilidad de alcanzar la carbono neutralidad, sobre todo si la materia prima para la gasificación es de origen forestal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a FONDEF (Fondo de Fomento del Desarrollo Científico y Tecnológico), por patrocinar este proyecto con el número de contrato FONDEF-R D11R1002, desarrollado entre los años 2012 -2015.

Referencias

- Al power Lab. Página de inicio de la wiki de GEK, en <http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123718/FrontPage>. Recuperado el 3 de marzo de 2014.
- Bahamonde V. (2015), "Análisis ambiental del gas pobre obtenido de la gasificación de residuos de lenga (*Nothofagus pumilio*), para su utilización en motores de combustión interna", Tesis de Ingeniero Químico y Medio Ambiente, Universidad de Magallanes.
- CERE-UMAG (2014), Proyecto FONDEF-R D11R1002, "Construcción, Instalación y Puesta en Marcha de Gasificador de Biomasa para Comunidades Aisladas", Universidad de Magallanes – CONICYT.
- Dogru, M., Howrath, C.R., Akay, G., Keskinler, B., Malik, A.A., (2002) Gasificación de cáscaras de avellana en un gasificador de corriente descendente. *Energy* 27, 415–427.
- Janajreh I., Al Shrah M., (2013), Investigación numérica y experimental de la gasificación de corriente descendente de astillas de madera. *Gestión y conversión de energía* 65, 2013, 783-792.
- Mc Kendry P., (2002), artículo de revisión: Producción de energía a partir de biomasa (parte 3): tecnologías de gasificación. *Bioresource Technology* 83,55–63.
- Nejar, N., (2007). "Catalizadores bimetálicos basados en potasio para la eliminación de NOx y carbonilla procedentes de motores diésel". Tesis Doctoral Depto. de Química Inorgánica. Universidad de Alicante, España.
- Sheth, P.N., Babu, B.V., (2009), Estudios experimentales sobre la generación de gas productor a partir de desechos de madera en un gasificador de biomasa de corriente descendente. *Materiales y procesos de fabricación*, 47-52.
- Zainal, Z.A., Ali, R., Quadir, G., Seetharamu, K.N., (2002), Investigaciones experimentales de un gasificador de biomasa de corriente descendente. *Biomasa y bioenergía* 23, 283–289.

CASO XV. Desempeño energético de un gasificador comercial de biomasa acoplado a un sistema de generación de potencia

Antonio José Bula Silvera^{1*}, Jorge Mario Mendoza Fandiño², Rafael David Gómez Vásquez³, Arnaldo Verdeza Villalobos^{1,4*}, Yuhan Arley Lenis Rodas^{1,5}, Humberto Vidal Gutiérrez⁶

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Fundación Universidad del Norte, Puerto Colombia, Atlántico, 081007, Colombia

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, Montería, Córdoba, 230002, Colombia

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Córdoba, 230002, Colombia

⁴ Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Atlántico, 080002, Colombia

⁵ Departamento de Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Antioquia, 050034, Colombia

⁶ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Provincia de Magallanes, 6200000, Chile

Resumen. En este caso de estudio se expone la caracterización de una planta de gasificación comercial de biomasa, modelo WBG – 20 de Ankur Scientific, instalada en un contenedor de carga, provisto de instrumentos de monitoreo que lo convierten en un laboratorio de gasificación móvil. El objetivo fue obtener las condiciones de operación adecuadas para el funcionamiento del equipo utilizando diferentes tipos de residuos agroindustriales, con miras a demostrar su efectividad ante diferentes materiales o biomásas, iniciando con el cusco de palma africana, dado que el uso de esta biomasa es de gran interés para el sector agroindustrial de extracción de aceite de palma, pues da valor agregado al residuo y alienta su uso en sistemas de autogeneración. El desarrollo de los proyectos asociados a esta iniciativa permitió identificar las condiciones operacionales óptimas para la gasificación del cusco de palma sin pretratamientos.

*Correspondencia: Antonio-José Bula-Silvera. E-mail: abula@uninorte.edu.co

1. Introducción

Colombia ocupa el cuarto lugar en el mundo como productor de aceite de palma africana, con una producción anual aproximada de 5,423 millones de toneladas de racimos de frutos frescos (Fedepalma, 2015). El principal producto extraído es aceite (aproximadamente un 21 wt. %), el restante 79 wt. % se consideran residuos que se van separando del producto final en diversas etapas del proceso de extracción de aceite. En total se tienen aproximadamente 1,188 millones de toneladas de residuos, de los cuales 721.000 toneladas son fibras y 352.000 toneladas de cuesco (Arrieta, et al., 2007). Adicionalmente, los problemas ambientales vinculados al uso de combustibles sólidos, así como un eventual escenario de desabastecimiento, fomentan la búsqueda de combustibles alternativos que permitan diversificar la canasta energética y reducir la dependencia de los energéticos no renovables. Entre las alternativas, se destaca la gasificación de biomasa, proceso que permite el uso de residuos forestales, agrícolas e industriales como materia prima, con la posibilidad de generar un gas combustible de baja densidad energética ($\sim 5 \text{ MJ/Nm}^3$) que puede ser utilizado en motores de combustión interna con pocas modificaciones (Heidenreich & Foscolo, 2015). Ante esta oportunidad, el grupo de investigación Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente – UREMA adscrito a la Universidad de Norte Barranquilla, Atlántico, Colombia propone un proyecto, que luego fue financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, y que buscaba evaluar el potencial de la biomasa derivada de la agroindustria, principalmente de la industria de producción de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*), como apoyo energético a zonas rurales no interconectadas o procesos agroindustriales.

2. Desarrollo

2.1. Caracterización de la biomasa

El proyecto contempló la caracterización del desempeño energético de una planta de gasificación de lecho fijo WBG – 20 de Ankur Scientific usando cuesco de palma, con miras a la valoración de esta biomasa y su posterior uso energético.

Tabla 1. Porcentajes en masa de las partes del fruto de la palma (Arrieta et al., 2007)

Residuo	% en masa del racimo de fruta fresca		
	Mínimo	Máximo	Promedio
Racimos de frutos vacíos	17,7	26,1	21,9
Fibra	11,6	15	13,3
Cuesco	5	8	6,5

Inicialmente se realizó una revisión general del proceso de extracción de aceite de palma africana, se identificaron las diferentes etapas del proceso y los puntos donde se generan los residuos principales. Un esquemático del proceso se muestra en la Figura 1.

La Figura 2 ilustra las partes constitutivas del fruto de palma de aceite y la Figura 3 los residuos obtenidos para facilitar la identificación de cada material. Además, la Tabla 1, muestra el porcentaje de residuos generados con base en el peso total del racimo de fruta fresca, esto con el propósito de estimar la cantidad de biomasa utilizable que se genera por unidad de masa de racimos de fruta fresca cosechada.

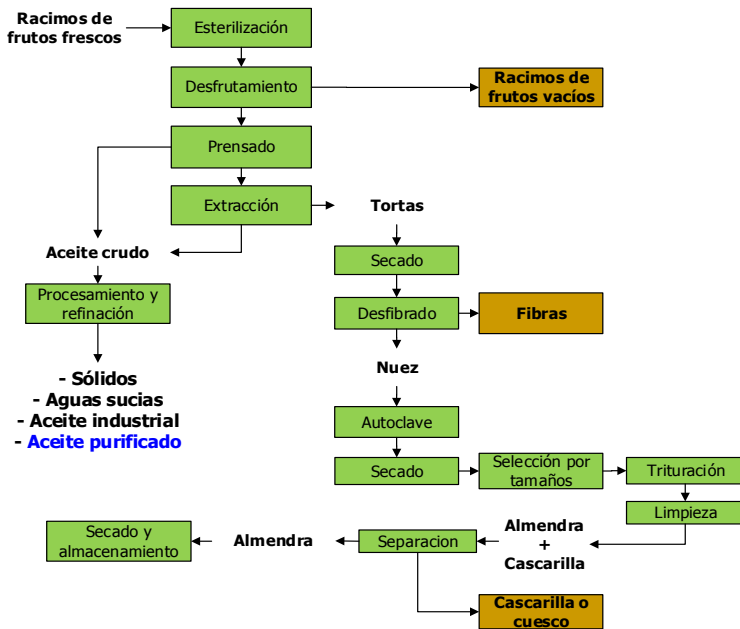


Figura 1. Diagrama del proceso de extracción del aceite de palma, tomada de (Fuente: Snarskis, 1989; Mahlia et al., 2001).

En la selección de la biomasa para la gasificación, se da preferencia a materias primas disponibles in situ o que no requieren ser transportadas a lugares distantes, y que tampoco requieran pretratamientos como el secado, la trituration o reducción de tamaño, lo cual aliviana los costes de generación. Por otra parte, vale mencionar que, para la gasificación en lecho fijo, el uso de biomásas granulares de media y alta densidad, con baja humedad, favorecen la producción de un gas de mayor calidad, es decir, con mayor poder calorífico, mayor eficiencia de conversión y bajos niveles de alquitrán (McKendry, 2002).

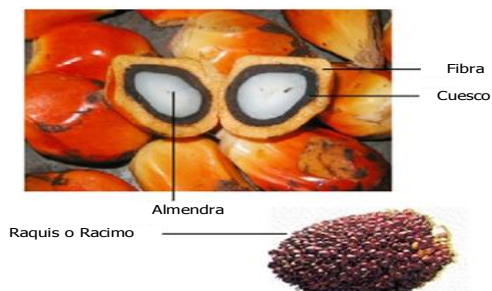


Figura 2. Morfología del fruto de la palma africana.

El primer paso en la caracterización de la biomasa es realizar los análisis próximo y último, con el objetivo de estimar su composición química y potencial energético. En este caso, la biomasa de origen vegetal está constituida por materia orgánica que tuvo origen inmediato en el proceso de fotosíntesis, lo que convierte a esta alternativa en un recurso completamente renovable. Además, se obtienen las propiedades físicas del combustible, entre ellas la granulometría, porosidad, factor de empaquetamiento, densidad aparente y granular (en la Tabla 2, se muestra un resumen de las características del cuesco de palma).



Figura 3. Racimos vacíos, fibra y cuesco.

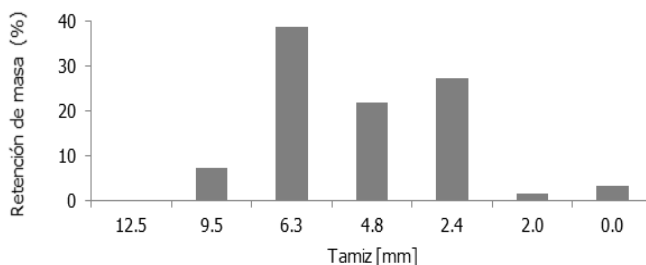
La densidad aparente y a granel se obtienen usando el estándar ASTM E873 – 82 como propone Lenis et al., (2016), y para la densidad real de la biomasa, se consideró el valor de referencia para la madera rígida 1500 kg/m^3 (Basu, 2013; Ninduangdee & Kuprianov, 2013). La porosidad y empaquetamiento se obtuvieron usando las ecuaciones propuestas por Basu, (2013) y el análisis granulométrico se realizó siguiendo la norma INVE-123-07, como sugiere Ninduangdee & Kuprianov, (2013). Las propiedades físicas se estiman con el objetivo de entender mejor los resultados obtenidos del proceso y su fenomenología, además, ayuda a generar bases de datos que permitan validar modelos de gasificación considerando condiciones similares a las usadas en nuestro trabajo.

Tabla 2. Características del cuesco de palma

Análisis próximo		
Parámetro	Valor (wt. %)	Estándar
Humedad	5,91	
Volátiles	76,82	ASTM D 7282.15
Carbono fijo	13,71	
Cenizas	3,56	
PCS (kJ/kg)	19690	ASTM D 7282.15
Análisis último		
Componente	Valor (wt. %)	Estándar
Carbono	48,75	ASTM D 5373
Hidrógeno	5,55	
Nitrógeno	0,80	
Azufre	0,10	ASTM D 4239 Método A
Oxígeno	35,33	Por diferencia
Propiedades físicas		
Granulometría (mm)	4,860 ±2,269 *	
Densidad aparente (kg/m ³)	1.186	
Densidad a granel (kg/m ³)	388	
Porosidad (ϵ_p)	0,22**	
Índice de empaquetamiento (ϵ_p)	0,67**	

* Calculado con base en un análisis de media para datos agrupados, a partir de la distribución de tamaño de partículas. (Figura 4)

** Cálculo basado en valores de referencia tomados de (Basu, 2013; Ninduangdee & Kuprianov, 2013)

**Figura 4.** Análisis distribución de tamaño de partículas del cuesco de palma

2.2. Planta de gasificación y propuesta experimental

Una vez caracterizada la biomasa, se planteó un programa experimental, con el propósito de evaluar la influencia del flujo de aire, alimentación de biomasa y remoción de cenizas, sobre la densidad energética del gas combustible obtenido y la eficiencia en frío y la tasa de consumo de biomasa. Para ello se desarrolla un diseño de experimentos factorial de media fracción 24-1 (cuatro factores, tres niveles y tres puntos centrales), enfocado en obtener el nivel de significancia de cada factor y evaluar la curvatura. Considerando las limitaciones operativas del equipo y del proceso, los factores definidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Consideraciones experimentales.

Factores controlados		
Factor experimental.	Nivel del factor	
	bajo (-1)	alto (1)
Tiempo de apagado, vibración de la tolva (s).	1200	3600
Tiempo de encendido removedor de cenizas (s).	12	42
Tiempo de apagado removedor de cenizas (s)	40	200
Flujo de aire que ingresa al reactor.	10,99	21,07
Factores no controlados		
Tiempo de encendido, vibración de la tolva.	60 s	
Presión del lecho-presión atmosférica.	101,325 kPa	
Velocidad de giro y peso de la masa acoplada al motor desbalanceado de la tolva.	1.370 rpm – 1,47 N	
Velocidad de giro y torque aplicado por el motor para remover las cenizas.	1,0 rpm – 3,92 N·m	
Humedad de la biomasa.	6-8 wt. %	
Propiedades fisicoquímicas de la biomasa.	Análisis elemental, PCS, granulometría, densidad, porosidad y empaquetamiento (ver tablas 1 y 2).	
Composición química del aire.	%N ₂ , %O ₂ , %CO ₂	
Temperatura del ambiente	30-36°C	
Humedad del ambiente	75-85%	
* Los factores asociados al tiempo de vibración de la tolva, están relacionados con la alimentación de biomasa.		
** El tiempo de encendido o apagado del removedor de cenizas, está asociado a la remoción de cenizas.		
*** El flujo de aire se ajusta mediante una válvula, esta estrangula el flujo de agua que entra al eyector y genera la succión de los gases combustibles por efecto Venturi.		

La instalación experimental está compuesta por una planta comercial de generación de 11 kWe que utiliza un reactor de gasificación de corriente descendente acoplado a un grupo electrógeno, valuada en \$45.000 USD (2011). El sistema fue diseñado y construido por la empresa Ankur Scientific para la generación de potencia utilizando astillas de madera, y luego adaptado a un contenedor para proporcionar movilidad y desplazarlo a zonas con disponibilidad de materia prima, buscando evaluar su compatibilidad con el equipo y potencial energético. La adaptación conllevó a una inversión de \$18.000 USD (2012) y en la Figura 5, se muestra una foto del laboratorio de gasificación en operación.



Figura 5. Planta de gasificación (Fuente: Verdeza, 2015. Universidad del Norte, Barranquilla – Colombia).

El equipo fue instrumentado con sensores de temperatura y un medidor de flujo volumétrico de aire. Por otro lado, el gas producto es analizado con un cromatógrafo de gases Agilent 490 Micro-GC, valuado en \$52.000 USD (2013). Para el desarrollo de cada experimento, el lecho del reactor fue cargado con carbón vegetal y biomasa, ajustando los parámetros operacionales del equipo designados como factores experimentales, y encendiendo todos los elementos de medición y sistemas adquisición de datos. Luego de iniciado el sistema de arrastre de aire y gases, se realizaba la ignición del reactor, proceso que tarda alrededor de dos minutos. El encendido se consolidaba a los 15 minutos, tiempo en el cual se iniciaba el arranque del grupo electrógeno, y el estado estable se alcanzaba a los 60 minutos. Aunque la recolec-

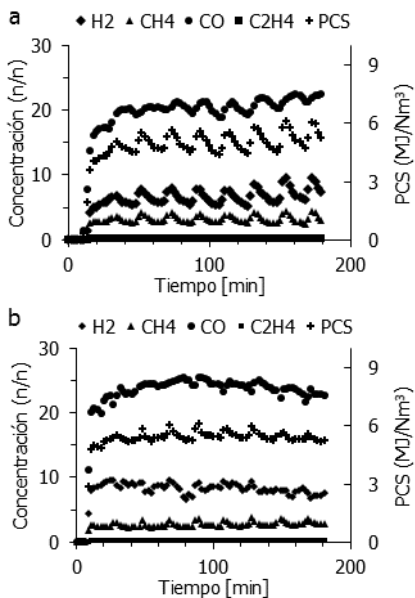
ción de datos se inicia desde el encendido del equipo, los parámetros analizados solo consideran la información recolectada durante el estado estable, debido a nuestro interés de evaluar la estabilidad de la generación del gas de síntesis durante jornadas extensas. Al finalizar la prueba se retira y pesa la biomasa sobrante dentro de la tolva, al igual que el carbón en el lecho y las cenizas. La tasa de consumo de biomasa es determinada como la diferencia entre el peso inicial y final de la biomasa dividido por el tiempo de duración de la prueba, metodología similar a la usada por Sharma & Sheth, (2016). El poder calorífico superior (PCS) de cada muestra de gas se calcula de forma indirecta utilizando la composición del gas de síntesis obtenida con ayuda del cromatógrafo de gases, y el PCS promedio de cada prueba, se calcula como la media aritmética del poder calorífico de las muestras tomadas durante el periodo de estado estable. El rendimiento se calcula como la relación entre la energía que entrega el proceso a través del gas obtenido y la biomasa utilizada.

3. Resultados de la gasificación de cuesco de palma africana

El análisis de los resultados se realiza siguiendo dos enfoques. Inicialmente se determina cuáles de los factores operacionales evaluados son estadísticamente significativos. Seguidamente, se analiza el efecto de la relación de equivalencia sobre los principales parámetros de desempeño del proceso. Encontramos que, el PCS del gas sólo se ve afectado de manera significativa por el factor alimentación de biomasa. Las variaciones del flujo de aire y de la remoción de ceniza no se identificaron como significativas, resultado similar al que fue hallado para la relación de equivalencia. Por otro lado, la eficiencia del proceso es afectada en mayor medida por el flujo de aire, factor que se muestra significativo para dicha variable. En trabajos previos se ha establecido que el PCS del gas varía dependiendo del flujo de aire utilizado (Jangsawang et al., 2015; Jeya Singh & Sekhar, 2016), sin embargo, no nos fue posible llegar a este resultado, debido a que las variaciones naturales del proceso inducen cambios en el PCS con mayor significancia estadística que los ocasionados por el flujo de aire en el rango evaluado. En el análisis se logra apreciar como el PCS del gas disminuye con la reducción de la alimentación de biomasa, y el proceso se mueve hacia la combustión. Respecto a la eficiencia, esta se ve favorecida con el aumento del flujo de aire, lo que se encuentra relacionado con el desarrollo de las reacciones de oxidación. De acuerdo con la literatura, el desempeño de este tipo de equipos se ve fuertemente afectado cuando son operados a carga parcial, debido a que un flujo de aire deficiente no garantiza la liberación necesaria de energía por las reacciones exotérmicas que sostienen una temperatura adecuada para el proceso (Sheth & Babu, 2009; Zainal et al., 2002; Quaak et al., 1999). Por último, el ER (relación de equivalencia) presenta una dependencia sutil respecto a la variación de la alimentación de biomasa, resultado que es consistente con lo esperado, pues bajo estas condiciones el proceso tiende hacia la combustión. Estos resultados pueden revisarse con más detalle en el trabajo publicado sobre este análisis (Verdeza et al., 2019).

La Figura 6 muestra los perfiles de concentración de los gases combustibles y el PCS, para diferentes condiciones de funcionamiento. Es de resaltar la sincronía entre

los tiempos de agitación del reactor para la alimentación de biomasa, y la variación observada en las curvas (ver Figura 6 a y c). Además, se aprecia una disminución en la variación cuando se maneja un nivel flujo de aire alto, (ver Figura 6 b y c). Estos dos fenómenos se atribuyen a la fluctuación de la temperatura, resultado de la biomasa nueva que ingresa a la zona de reacción con el estímulo inducido por vibración y el tamaño de la zona de reacción, el cual se intuye mayor al aumentar el flujo de aire, garantizando mayor estabilidad en la temperatura. Por último, en la Figura. 6 d, se muestra el comportamiento del equipo en condiciones de bajo flujo de aire y bajo estímulo de alimentación de biomasa, lo que representa una baja alimentación de aire y de biomasa, resultando ser el punto experimental que registró la menor eficiencia y PCS promedio. Acorde a la bibliografía, en la práctica un reactor de gasificación de corriente descendente no consta de un flujo de gases ni combustible uniformemente distribuido en toda su sección transversal, por esto cada reactor tiene su propia dinámica y generalmente predominan las restricciones impuestas por la cinética de las reacciones que tienen lugar en el proceso. (Arena, 2012; Sheth & Babu, 2009).



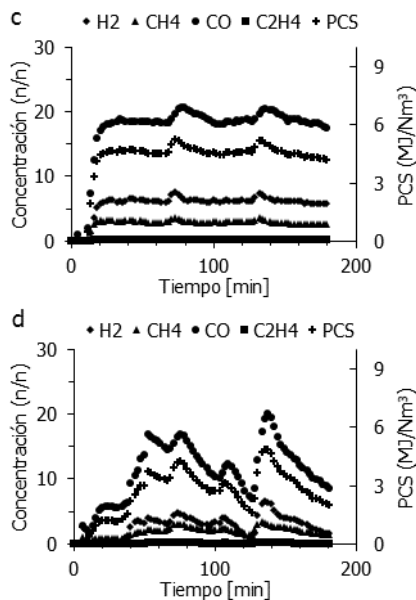


Figura 6. Perfil de la concentración de gases combustibles durante las pruebas a) alto estímulo de alimentación de biomasa y bajo flujo de aire, b) alto estímulo de alimentación de biomasa y alto flujo de aire, c) bajo estímulo de alimentación de biomasa y alto flujo de aire y d) bajo estímulo de alimentación de biomasa y bajo flujo de aire.

Respecto a nuestro segundo enfoque, la Figura 7 muestra cómo el PCS disminuye cuando la ER aumenta, lo que se debe a la menor producción de gases combustibles causada por el aumento en la disponibilidad de aire para el proceso. Como fue mencionado anteriormente, las variaciones observadas son inevitables debido a la forma de operación de este tipo de reactores. El punto atípico observado corresponde a la operación del reactor de gasificación en el nivel de baja alimentación de biomasa y bajo flujo de aire (ver Figura 6d). Pese a la tendencia observada para el PCS, la eficiencia del proceso se ve beneficiada con el aumento de la relación de equivalencia. Bajo estas condiciones disminuye la biomasa alimentada al proceso y se alcanzan mayores temperaturas al interior del lecho, es decir, se tiene menor energía entrando al proceso a la vez que se favorecen las reacciones de gasificación.

En general, la relación de equivalencia medida se mantuvo entre 0,22 y 0,38, rango para el cual se han reportado resultados satisfactorios de gasificación (Martínez et al., 2012; Zainal et al., 2002), con PCS para el gas de síntesis entre 3,10 y 5,54 MJ/Nm³ y eficiencias en frío entre 31,8 y 60,3%. Considerando que tanto el PCS

como la eficiencia del proceso son de relevancia para su buen funcionamiento, el mejor punto de operación se ubicó en $ER=0.35$, donde el PCS del gas y la eficiencia del proceso fueron de 5.04 MJ/Nm^3 y 58% respectivamente (ver Figura 7b), generando aproximadamente $3,59 \text{ kWh/kg}$ de biomasa.

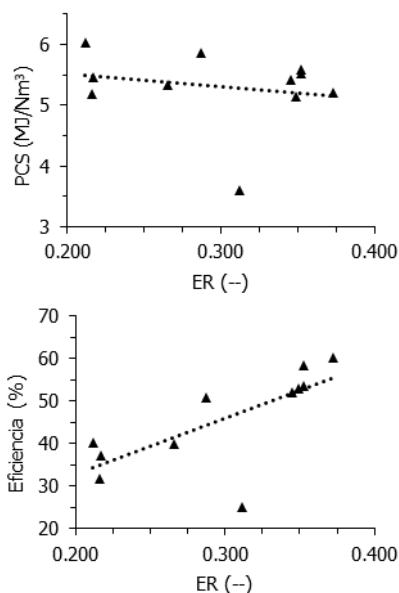


Figura. 7. PCS del gas de síntesis y eficiencia del proceso en función del ER.

4. Conclusiones del estudio

En Colombia, se requiere una inversión inicial aproximada que asciende a los \$6.380 USD para completar la conversión de un kilogramo por hora de cuesco de palma africana utilizando una planta de gasificación de lecho fijo a pequeña escala, generando aproximadamente $3,59 \text{ kW}$ de potencia térmica o 0.86 kW de potencia eléctrica a través un grupo electrógeno, asumiendo una eficiencia de conversión en frío del gas de síntesis en el grupo electrógeno del 24% .

El cuesco de palma africana, puede ser utilizado como combustible en un reactor de gasificación comercial de corriente descendente sin mayores dificultades, sin embargo, es recomendable ajustar los parámetros operacionales del equipo para encontrar un punto de operación adecuado. En este caso la experimentación es el mejor medio para la caracterización y optimización del proceso, ya que se basan en el comportamiento real del equipo.

Se evidenció experimentalmente la influencia de los parámetros operacionales del proceso de gasificación, sobre sus principales variables de rendimiento, como son el PCS del gas combustibles y la eficiencia. Además, se encontró que las condiciones de operación no sólo influyen en el valor promedio del PCS, sino que ocasiona fluctuaciones durante el funcionamiento regular del equipo. Por otro lado, es de resaltar la dificultad que representa cambiar las condiciones de operación del reactor, dada la naturaleza de funcionamiento del equipo. Se encontró que el comportamiento del reactor depende en gran medida de la manera en cómo se modifique la relación aire/combustible, al igual que la modificación propiamente, esto dificulta.

5. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

Bajo la experiencia de los autores, la gasificación es una tecnología madura entre los métodos existentes para aprovechar el potencial energético de la biomasa vegetal generada por procesos agroindustriales. Sin embargo, se ve limitada principalmente por el bajo contenido energético, la presencia de material particulado y compuestos condensables en el gas de síntesis. Este hecho genera incompatibilidad con las tecnologías disponibles para la conversión energética del gas combustible en motores de combustión, calderas y turbinas, restándole protagonismo en el mercado energético al aumentar sus costos de mantenimiento. Por otro lado, aunque se tienen diversos enfoques como la generación de energía descentralizada de uso doméstico o el suministro de apoyo energético a procesos industriales que dispongan de materia prima adecuada para sustentar la conversión de manera continua, una de las limitantes más graves, es la falta de personal capacitado para operar un sistema de gasificación, y la dificultad para formarlo, dada la complejidad del proceso y los diversos factores que influyen en él.

Posterior al desarrollo del proyecto presentado en este caso de estudio, una de las aplicaciones que se le ha dado al laboratorio de gasificación, y uno de los resultados más destacados, es la formación de profesionales de alto nivel, con las habilidades necesarias para emprender proyectos que implementen dicha alternativa a nivel piloto e industrial. Esto con el objetivo de crear un banco de profesionales que impulse el desarrollo continuo de esta tecnología, promueva su implementación en la industria, afronten los retos asociados a la sostenibilidad del proceso a largo plazo y propongan nuevas estrategias que ayuden a amortiguar los costos de montaje y funcionamiento. Como consecuencia final, se busca diversificar la canasta energética del país y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Otra aplicación del laboratorio ha sido el desarrollarlo proyectos Universidad – Empresa. Un ejemplo es el proyecto, Valoración Energética de los Residuos del Proceso de Extracción de Aceite de Palma Africana Mediante Gasificación, orientado a buscar soluciones para todos los subproductos del proceso de extracción de aceite. Otro proyecto derivado de la puesta en marcha del laboratorio inició bajo el convenio especial de cooperación Integración Tecnológica de Recursos Energéticos Renovables en Sistemas Productivos Agrícolas y Agroindustriales, financiado por el Sistema de Regalía del departamento de Córdoba, Colombia y ejecutado por la Universidad

Pontificia Bolivariana Montería, Colombia, cuya meta fue evaluar experimentalmente la compatibilidad de diferentes biomásas regionales, como la cascara de coco, tusa de maíz, residuos de la cosecha de algodón y ajonjolí, con el proceso de gasificación en lecho fijo, buscar alternativas para su uso e integrar diversos sistemas de generación de energía para garantizar un suministro de potencia continuo basado en fuentes renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de COLCIENCIAS a través de las diferentes convocatorias que hicieron posible la financiación de los proyectos involucrados, en especial la Convocatoria Doctorados Nacionales 727/757, del Fondo nacional de financiamiento para la ciencia, la tecnología e innovación FCTeI del sistema general de regalías SGR, la Universidad del Norte, Universidad Pontificia Bolivariana y Universidad Simón Bolívar Barranquilla-Colombia.

Referencias

- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>.
- Arrieta F. R., Teixeira F. N., Yáñez E., (2007). Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry. *Biomass and Bioenergy*, 31, 503–511.
- Basu, P. (2013). Biomass Characteristics. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp. 47–86). Elsevier. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00003-4>.
- Fedepalma. (2015). Anuario Estadístico 2015 - La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. Retrieved from <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/11721/11712>.
- Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72–95. doi.org/10.1016/j.pecc.2014.06.002.
- Jangsawang, W., Laohalidanond, K., & Kerdsuwan, S. (2015). Optimum Equivalence Ratio of Biomass Gasification Process Based on Thermodynamic Equilibrium Model. *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.528>.
- Jeya Singh, V. C., & Sekhar, S. J. (2016). Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock. *Applied Thermal Engineering*, 97, 22–27. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.099>.
- Lenis, Y. A., Pérez, J. F., & Melgar, A. (2016). Fixed bed gasification of Jacaranda Copaia wood: Effect of packing factor and oxygen enriched air. *Industrial Crops and Products*, 84, 166–175. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.053>
- Mahlia, T., Abdulmuin, M., Alamsyah, T., & Mukhlisien, D. (2001). An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia. *Energy Conversion and Management*, Vol 42(18), pp. 2109–2118.

-
- Martínez, J. D., Mahkamov, K., Andrade, R. V., & Silva Lora, E. E. (2012). Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renewable Energy*, 38(1), 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.035>.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55–63. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1).
- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2013). Study on burning oil palm kernel shell in a conical fluidized-bed combustor using alumina as the bed material. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(6), 1045–1053. <http://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.06.011>.
- Quaak, P., Harrie, K., & Hubert, S. (1999). *Energy from Biomass. A Review of Combustion and Gasification Technologies.* (The World Bank, Ed.). Washington D.C
- Sharma, S., & Sheth, P. N. (2016). Air – steam biomass gasification : Experiments , modeling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 110, 307–318. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.030>.
- Sheth, P. N., & Babu, B. V. (2009). Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier. *Bioresource Technology*, 100(12), 3127–3133. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.024>
- Snarskis, M. (1989). *Compendio de Agronomía Tropical Tomo II.* San José, Costa Rica: Servicio editorial IICA.
- Verdeza A. V., Lenis Y. R., Bula A. S., Mendoza J. F. Gómez R. V., (2019), Performance analysis of a commercial fixed bed downdraft gasifier using palm kernel shells. *CT&F - Ciencia, Tecnología & Futuro.* 9(2), 79 – 88.
- Zainal, Z. ., Rifau, A., Quadir, G. ., & Seetharamu, K. . (2002). Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 23(4), 283–289. [http://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00059-4](http://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00059-4).

CASO XVI. Revalorización energética de residuos del sector cervecero

Iván Rebollo, Gregorio Molina¹, Isabel Ortiz¹, José María Sánchez¹

1 Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible, CIEMAT, 28040, Madrid, España.

Resumen. El bagazo es el principal residuo del proceso de fabricación de la cerveza y, aunque tiene una humedad elevada, su poder calorífico es considerable. Por ello, su utilización como combustible para la producción de energía es de gran interés, y más dentro de la tendencia actual de desarrollar procesos de producción englobados en la economía circular. El objeto de este trabajo es el diseño de una planta de cogeneración que permita la obtención de energía térmica y eléctrica a partir del bagazo generado en la propia industria cervecera, energía que puede ser utilizada en las diferentes etapas del proceso productivo, con el consecuente ahorro económico. En este trabajo se revisan todas las fases del proceso de revalorización energética del bagazo aplicándose al caso concreto de una micro-cervecera: desde el secado del bagazo mediante un secadero solar para reducir la humedad original hasta un valor inferior al 10 %, la peletización y un proceso de gasificación para su aprovechamiento vía termoquímica y la producción de un gas de síntesis. Dicho gas, una vez depurado, es llevado a un motogenerador para la producción de electricidad. La producción de calor se realiza mediante dos generadores de vapor que aprovechan el calor residual del gas que abandona el gasificador y el motor de combustión. Para el caso de estudio analizado, el aprovechamiento energético del bagazo de cerveza supondría un ahorro energético en la industria estudiada del 26,5 % en consumo eléctrico y del 19 % del consumo térmico aportado vía gasóleo o gas natural.

*Correspondencia: José María Sánchez. E-mail: josemaria.sanchez@ciemat.es

1. Introducción

1.1. Contexto

Actualmente, Europa sostiene la segunda industria cervecera más potente del mundo, con una producción superior a los 40 millones de m³ anuales. El sector cervecero europeo es muy variado, está formado por grandes plantas de producción, pero también pequeñas productoras de cerveza artesanal que operan de forma independiente (Kawa et al., 2015). En la Figura 1 se puede ver a la izquierda el número total de industrias cerveceras y a la derecha el de las microcervecerías.

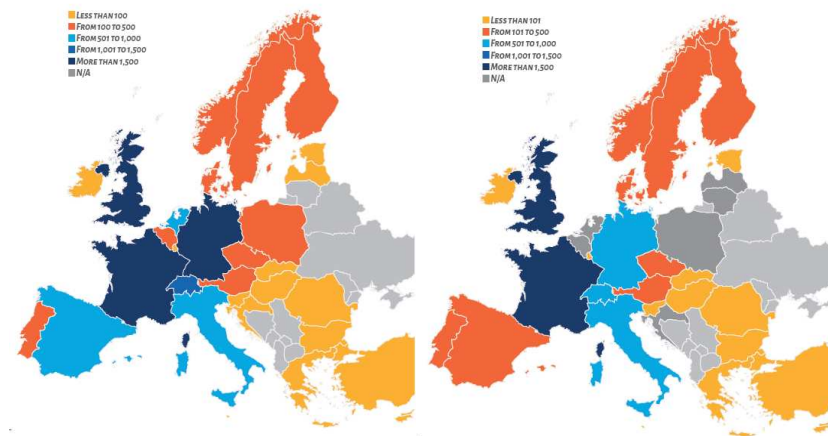


Figura 1. Mapa de las industrias cerveceras en Europa: total (izquierda), microcervecerías (derecha) (Fuente: European Beer Trends Statistics report. 2019 Edition).

Al igual que en el resto de Europa, en España se ha dado un incremento continuado no solo en el número de cervecerías, sino también en la producción. La cerveza representa en España el 1,3 % del PIB y su valor en el mercado supera los 7000 millones de euros. (Cerveceros de España, 2019). En el caso de la cerveza artesanal, el número de empresas se ha multiplicado por diez desde 2010. Este sector cerró el 2019 con un crecimiento del 3,4 % y una previsión de crecimiento para el 2020 del 35,4 % con respecto al 2019 (Rodero, 2020), en un contexto pre-COVID.

Como cualquier actividad, la elaboración de cerveza genera impactos ambientales a lo largo de toda la cadena de valor, desde la producción de las materias primas hasta su distribución y consumo pasando por su elaboración. Para mitigar los impactos generados en la producción y consumo de cerveza hay que apostar por la economía circular. El Parlamento Europeo define "la economía circular como un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar

y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende". En la práctica, implica reducir la generación de residuos al mínimo (Duch Guillot, 2021).

Con el objetivo de fomentar la economía circular y potenciar la sostenibilidad y la minimización de los impactos ambientales, el sector cervecero ha definido las siguientes líneas de actuación hasta 2025 (Cerveceros de España, 2019):

- Circularidad de envases.
- Transición hacia un modelo de eficiencia energética más sostenible.
- Reducción de la huella de carbono y apoyo al cumplimiento del Acuerdo de París.
- Optimización en el uso del agua.
- Innovación y sensibilidad ambiental.

En la búsqueda de contribuir con soluciones alineadas con la economía circular, en este capítulo se presenta un estudio que permite valorizar energéticamente uno de los principales residuos de la industria cervecera consiguiendo el doble objetivo de minimizar la producción de desechos y utilizar energía renovable minimizando las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2. Descripción del proceso de producción de cerveza

El proceso de producción de la cerveza esquematizado en la Figura 2 comienza con la obtención de la malta (malteado)(1). Este proceso no suele realizarse en la fábrica de cerveza habiendo instalaciones especiales para su obtención. El malteado del cereal (cebada) es un proceso vital para la obtención de cerveza ya que permite el desarrollo de las enzimas encargadas de transformar el almidón en azúcares. Durante el proceso, los granos seleccionados se someten a ciclos de remojo para que absorban agua y se mantienen a una temperatura controlada hasta conseguir la germinación del cereal. Cuando se alcanza el grado de germinación necesario, los granos se secan para eliminar el germen y proporcionar a la malta las características deseadas que vendrán en función del tiempo de secado.

Una vez producida la malta, esta se tritura y se mezcla con agua caliente para su maceración (3). Durante la maceración se produce la transformación del almidón en azúcares fermentables y la degradación de las proteínas en péptidos y aminoácidos necesarios para la fermentación posterior. Tras la maceración, el grano de cereal gastado llamado bagazo de cerveza o BSG (brewers' spent grain) se obtiene como residuos sólido en una etapa de filtración mientras que con el líquido, una solución no alcohólica denominada mosto cervecero o wort, se elaborará la cerveza.

El mosto se lleva a un hervidor (4) donde se añade el lúpulo que dará el sabor a la cerveza. En la ebullición se produce la coagulación de las proteínas disueltas y la eliminación del exceso de agua. Una vez separado el lúpulo, el mosto se clarifica

eliminando las proteínas que han precipitado en el *whirl pool* mediante centrifugación (5). El mosto caliente se enfría (6) antes de pasar al fermentador (7) donde se añade la levadura que va a metabolizar los azúcares en alcohol y CO₂. En este proceso se mantiene la temperatura entre 10,5 y 15 °C dependiendo del tipo de cerveza. Una vez producida la cerveza, se separan las levaduras que puede ser reutilizadas hasta en 6 ocasiones y se deja madurar (8) un determinado tiempo dependiendo del tipo de cerveza (AINIA, 2019).

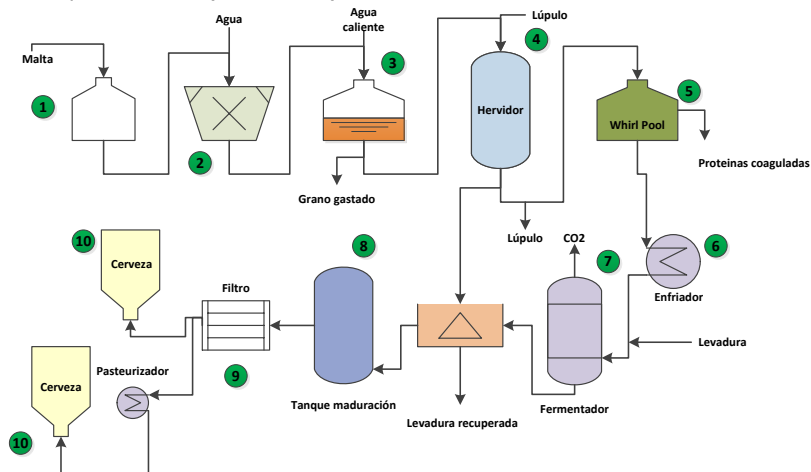


Figura 2. Esquema del proceso productivo de la cerveza. (Fuente: elaboración propia)

Como se observa, la producción de cerveza conlleva un uso intensivo de energía debido a los procesos a alta temperatura y, además, genera una importante cantidad de residuos sólidos (BSG y levaduras) que normalmente acaban en un vertedero (Olajire, 2020). Sin embargo, con las nuevas normativas y tecnologías enfocadas al desarrollo de procesos de producción basados en la economía circular, se pueden ver los residuos como potenciales fuentes de energía que incluso podrían llegar a suponer un ahorro tanto energético como monetario los empresarios. Aproximaciones a un modelo de economía circular en distintas industrias como la alimentaria, textil o papelera podrían llegar a suponer un ahorro del 20 % de los costes globales en energía (European Environment Agency, 2016).

1.3. Residuos generados en la fabricación de cerveza

Como todo proceso productivo, la producción de la cerveza tiene un impacto ambiental que viene dado principalmente por el alto consumo de agua, la generación de subproductos (BSG, levaduras o CO₂) y el uso intensivo de energía, tanto eléctrico

ca como térmica, que en la mayoría de los casos genera emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Los principales consumos de energía de este proceso son, por un lado, el calentamiento del agua necesaria para el proceso de malteado y la maceración de la malta, y, por otro lado, la producción de vapor para mantener la ebullición en el hervidor. Sin embargo, ya se ha indicado que el proceso de malteado no se suele realizar en las fábricas de cerveza por lo que este paso no será considerado. Se estima que el 75 % de la energía consumida en la producción de la cerveza es de naturaleza térmica, mientras que el 25 % restante es energía eléctrica (AINIA, 2019).

Como se ha descrito anteriormente, los principales residuos generados en la fabricación de cerveza son: el BSG, la levadura y el CO₂. De los tres, el más importante es el BSG que puede llegar a suponer el 85 % del total de los residuos generados por la cervecera. Con el objetivo de revalorizar este residuo se han estudiado diferentes aplicaciones, algunas de ellas se recogen en la Tabla 1. El alto cometido de azúcares y proteínas del BSG ha propiciado que se estudie su utilización para alimentación humana y animal. Entre estas aplicaciones, la más extendida es la alimentación animal. Sin embargo, dependiendo de la cantidad del residuo generado los cerveceros tienen que pagar por deshacerse de este residuo o bien los ganaderos solo asumen el coste del transporte hasta sus granjas. Por tanto, esta solución puede no ser rentable para todas las empresas.

Tabla 1. Aplicaciones del BSG. (Brewers Association; European Commission, 2017; Mussatto, 2014).

Aplicación	Desventajas
Alimentación animal	Costes asociados al transporte. Material degradable susceptible de contaminación microbiana.
Alimentación humana (productos de panadería)	Necesidad de pretratamiento (secado, producción de harina). Solo para aplicación en productos con color. Recomendado en bajas proporciones (menos de 100 g/kg).
Combustión	Pretratamiento necesario (secado). Emisiones de partículas y NOx.
Biogás	La digestión pura sufre de bajas tasas de degradación y requiere largos tiempos de residencia debido al alto contenido de fibra y agua. Caro.
Producción de carbón	Pobres propiedades: alta temperatura de ignición

Una alternativa atractiva para estas empresas puede ser la producción de energía a partir del BSG. En la actualidad, el sistema de producción de energía más utilizado en la industria cervecera es la digestión anaerobia para la obtención de biogás. Para

ello, utilizan mayoritariamente el enfoque clásico de depuración de las corrientes de agua residual. Aunque en principio, la digestión anaerobia del BSG se puede llevar a cabo, éste requiere un proceso de pretratamiento complejo para garantizar su viabilidad económica (THERCHEM, 2016). El BSG tiene un alto contenido en lignina que es difícil de degradar obteniendo como resultado una baja producción de biogás. Si unimos este hecho, al elevado coste inicial de la tecnología, resulta poco o nada rentable para empresas pequeñas con una producción limitada de BSG.

Como alternativa a la digestión anaerobia se presentan las tecnologías de conversión termoquímica que permiten obtener energía de los residuos promoviendo la economía circular. Las tecnologías de conversión termoquímica pueden dividirse en combustión, gasificación y pirólisis.

La combustión es la forma más sencilla de aprovechamiento energético. Desde hace mucho tiempo la biomasa se ha empleado en pequeñas calderas domésticas para generar calor. No obstante, para optimizar el aprovechamiento energético, es necesario conocer las propiedades químicas, físicas y térmicas del combustible. En comparación con los combustibles fósiles sólidos, la biomasa lignocelulósica suele tener un mayor contenido en humedad, volátiles y oxígeno elemental, así como un menor contenido en carbono fijo y elemental, lo cual implica un menor poder calorífico, menor densidad energética, un mayor tamaño de llama y menor temperatura de combustión. Un aspecto problemático suele ser el contenido en cenizas, ya que, aunque su contenido total suele ser inferior al del carbón, la presencia de cloro y de metales alcalinos hace que los componentes de esta fracción se fundan y se volatilicen a temperaturas relativamente bajas, originando problemas de ensuciamiento, deposición y corrosión (Contreras et al., 2020).

La pirólisis consiste en el calentamiento del combustible en ausencia total de oxígeno u otros agentes oxidantes. Como consecuencia de este calentamiento a temperaturas moderadas (hasta unos 600 °C), se produce la descomposición térmica de la biomasa y la obtención de tres fracciones principales de producto: sólido, líquido y gas. El control de las condiciones de operación, fundamentalmente de la temperatura final y la velocidad de calentamiento, permite dirigir el proceso a la obtención prioritaria de uno de estos tres productos. El producto sólido se maximiza a bajas velocidades de calentamiento de la biomasa, temperaturas moderadas y altos tiempos de residencia de los vapores de pirólisis, siendo el ejemplo clásico la producción de carbón vegetal, el cual puede usarse directamente como combustible o en otras aplicaciones (p.ej. enmienda orgánica (biochar), agente reductor para industria metalúrgica o como carbón activo). Si la pirólisis se realiza a altas velocidades de calentamiento, se favorece la producción de fracción líquida de producto, la cual contiene una amplia variedad de compuestos orgánicos, y puede sustituir total o parcialmente como combustible líquido al fuel-oil en calderas. Sin embargo, esta fracción líquida se degrada fácilmente al ser almacenada a temperatura ambiente, su contenido en agua es alto y su poder calorífico relativamente bajo, por lo que actualmente se está explorando el empleo de catalizadores directamente durante el proceso de pirólisis o como etapa posterior para la mejora de sus propiedades como combustible. La extracción de compuestos químicos de interés parece ser otra op-

ción viable para la valorización parcial del bio-oil (fenoles, oxigenados y ácidos orgánicos) (Contreras et al., 2020).

La gasificación es un proceso por el cual a partir de un combustible sólido (carbón, biomasa, residuos, etc.) se obtiene un gas combustible con un poder calorífico significativo que puede ser utilizado para la producción de energía. Este proceso de gasificación tiene lugar mediante una reacción de oxidación parcial entre el combustible sólido y un agente gasificante (normalmente aire, pero también puede utilizarse O_2 , vapor de agua y mezclas), a elevada temperatura (entre 700-1.200 °C), para producir un gas de síntesis o gas combustible de carácter reductor, compuesto principalmente por H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_nH_m) y unas cenizas. No obstante, en el proceso también se producen una serie de subproductos indeseables, tales como un residuo carbonoso producto de la descomposición térmica de la materia orgánica presente en el combustible denominado comúnmente "char", diferentes compuestos de azufre y nitrógeno (H_2S , COS, NH_3 , HCN), diferentes impurezas gaseosas como HCl o metales y fase vapor y, muy especialmente, un conjunto de compuestos orgánicos aromáticos con un peso molecular mayor que el benceno denominados comúnmente como alquitranes. Estos alquitranes constituyen el contaminante más crítico del proceso y su presencia en cantidades elevadas limita enormemente la calidad del gas generado y sus aplicaciones finales. Por ello, la minimización en la generación de alquitranes así como su eliminación posterior a través de diferentes sistemas de limpieza suponen el auténtico cuello de botella para la implementación a escala comercial de la gasificación de carbón, biomasa o residuos.

2. Desarrollo

2.1. Bagazo de cerveza

El bagazo de cerveza generado como residuo (Figura 2a) en la industria cervecera posee un elevado poder calorífico, razón por la cual su revalorización en forma de energía es una alternativa que merece ser estudiada en profundidad. Con ello se consigue un doble objetivo, reducir el volumen de residuos haciendo la empresa más sostenible y reducir los costes asociados a la producción de cerveza al implementar el concepto de economía circular.



Figura 2. Bagazo de cerveza bruto y pelletizado. Donde: a) BSG bruto y b) pellets de BSG (Fuente: Pérez, 2017, Soria España).

El primer paso es la preparación del BSG para su revalorización energética mediante un proceso de secado en el que se reduce el grado de humedad del bagazo desde aproximadamente un 76 % (humedad con la que se obtienen el BSG después del proceso de filtración) hasta un valor cercano al 10 %. Tras una etapa de peletizado (Figura 2b), se desarrolla un proceso de aprovechamiento energético vía termoquímica. De entre las posibles alternativas, se escoge la gasificación como tecnología de conversión termoquímica debido a que en comparación con la combustión del BSG, la gasificación es más versátil, tiene un menor impacto ambiental y se pueden conseguir rendimientos más elevados (Ortiz et al., 2019). La gasificación con aire consiste en un proceso de oxidación parcial del combustible, mediante la introducción de una cantidad de aire inferior a la necesaria para producir una combustión estequiométrica del combustible. De esta manera, se obtiene un gas de síntesis compuesto principalmente por H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O y N_2 que tiene un poder calorífico significativo ($4-6 \text{ MJ/Nm}^3$). El gas de síntesis tras su acondicionamiento se alimentará a un sistema de cogeneración para producir energía que será aprovechada en la fábrica de cerveza. Además, se plantea la recuperación de calor para producir vapor que será utilizado también en la fabricación de cerveza. El proceso global se esquematiza en la Figura 3.

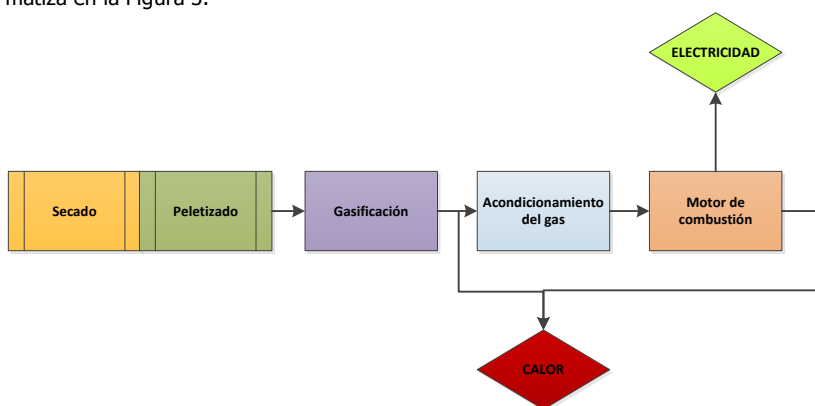


Figura 3. Esquema general del proceso (Fuente: elaboración propia).

2.2. Especificaciones del proceso

Para el diseño del sistema de revalorización energética del BSG se han tomado como referencia los datos reales de la industria cervecera "La Cibeles". Esta compañía tiene una pequeña fábrica de cerveza en el municipio de Leganés, localizado en la zona sur del área metropolitana de Madrid (España). Fundada en 2010 como una pequeña productora de cerveza artesanal y una producción anual aproximada de 500 m^3 , actualmente produce 1.512 m^3 de cerveza (datos del año 2020). A partir de esta producción, se procede a estimar la cantidad de materia prima empleada,

producción de residuos y necesidades energéticas que tiene la planta cervecera. Estos valores se recogen en la Tabla 2.



Figura 4. Instalaciones de la industria cervecera “La Cibeles”. (Fuente: Leganés, 2021, Vicente Alvarez)

Con los datos de producción de 1.512 m³ de cerveza en la fábrica “La Cibeles” se generan aproximadamente 300 toneladas anuales de BSG que puede ser aprovechado para producir energía y reducir los costes asociados a la fabricación de cerveza.

Tabla 2. Cantidades de materias primas, subproductos y energía requeridas estimadas en la producción de cerveza (Ortiz et al., 2019).

Parámetro	Cantidad por m ³ de cerveza	Total estimado 2020
Materias primas		
Agua	6 m ³	9.072 m ³
Malta	200 kg	302 t
Levadura	50 l	76 m ³
Subproductos		
BSG	200 kg	302 t
Levadura	0,2 m ³	302 m ³
CO ₂	33 kg	50 t
Energía		
Electricidad	238 kWh	360 MWh
Gasóleo	371 kWh	560 MWh

A la hora de proceder a la valorización energética de un residuo, el primer paso es conocer su composición. En el caso del BSG, está formado por una mezcla de cáscaras que recubren el grano de malta de la cebada original con parte del pericarpio y las capas de cubierta de la semilla que se obtienen como residuo sólido tras la etapa de extracción del mosto (Mussatto, 2014). Desde el punto de vista energético, los parámetros más importantes a tener en cuenta son la humedad y el poder calorífico. Para poder considerar la valorización energética como una solución viable, el combustible a utilizar debe contener un poder calorífico elevado (> 15 MJ/kg) y una humedad no superior al 15 %.

En la tabla 3, se muestran los resultados de la caracterización del BSG. Como se puede observar este presenta un alto poder calorífico en base seca similar a otras biomásas comercialmente disponibles como los huesos de aceituna o el serrín de abeto (Jenkins et al., 1998). Sin embargo, debido al método de obtención de este residuo, el contenido en humedad es muy elevado (76 %), por tanto, será necesaria una etapa de secado previa a su utilización como combustible.

En el caso de otros parámetros importantes para las aplicaciones energéticas como el contenido en cenizas y la materia volátil, el BSG presenta valores similares a otras biomásas típicas utilizadas como combustibles como las astillas de pino. Además, el BSG presenta bajo contenido en cenizas y compuestos alcalinos con lo que se minimizan los riesgos asociados a fenómenos de sinterización. Por último, hay que fijarse en la presencia de nitrógeno, azufre y cloro, dado que predicen la formación y presencia de contaminantes en el gas generado y por tanto las necesidades de equipos de limpieza y acondicionamiento del gas para su posterior utilización. En el caso del BSG, el contenido en nitrógeno y azufre es relativamente alto por lo que estos elementos habrán de ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar cualquier aplicación.

Tabla 3. Caracterización y análisis elemental del BSG producido en la empresa La Cibeles (Ortiz et al., 2019).

Parámetro	Valor	Unidades
Humedad	76	%p/p
Cenizas	3	%p/p b.s*.
Material volátil	79	%p/p b.s.
Carbono fijo	18	%p/p b.s.
PCI	19	%p/p b.s.
Análisis elemental		
C	49	%p/p b.s.
H	6,8	%p/p b.s.
N	3,5	%p/p b.s.
S	0,24	%p/p b.s.
Cl	0,04	%p/p b.s.
O	38	%p/p b.s.

*Porcentaje en peso en base seca.

Secado

Como se ha comentado anteriormente, el BSG se obtiene con un contenido de humedad elevado que imposibilita su utilización directa como combustible. Para el secado de biomasa y de cualquier otro tipo de sólido se han empleado tradicionalmente técnicas como el prensado, el secado con aire o máquinas centrífugas (Amos, 1998). La selección de la tecnología más adecuada va a depender de numerosos factores como la cantidad o la aplicación final del material a secar. Para este caso, se va a optar por un secadero solar con el fin de reducir los costes y maximizar la recuperación de energía dado que el mayor inconveniente de esta tecnología es la necesidad de terreno.

Un secadero solar de tipo invernadero es una instalación cubierta por materiales transparentes, normalmente plásticos, diseñado para mantener una temperatura más elevada que la del ambiente. El calentamiento del interior del invernadero se produce por el efecto producido por la radiación solar que penetra en su interior. La biomasa y el aire del interior del invernadero se calientan y emiten energía en forma de radiación infrarroja. Los plásticos o el vidrio empleado son altamente transparentes a la radiación ultravioleta y visible, pero opacos ante la radiación infrarroja. De esta forma, el calor penetra en forma de radiación pero no escapa del mismo, consiguiendo así que aumente la temperatura interior. Este efecto invernadero suele ser usado para el cultivo de plantas, pero en este caso se aprovecha para el secado del BSG. La principal ventaja de este tipo de secaderos es la baja demanda de energía, aparte de la solar, lo que provoca una alta rentabilidad en términos económicos y energéticos (Elkhadraoui et al., 2015).

Para el diseño del secadero es necesario conocer, los datos climatológicos del lugar donde se va a instalar el secadero (cuanto mayor sea la temperatura y menor sea la humedad del ambiente mayor será la eficiencia del secadero y menor el área requerida), la cantidad de material que ha de secarse y la humedad inicial y final del mismo. Con estos valores se puede utilizar el modelo propuesto por Kumar y Tiwari (Kumar et al., 2006) en el que se proponen las ecuaciones de conservación de energía entre los distintos elementos del secadero con el objetivo de poder calcular la temperatura en el interior del invernadero y posteriormente la tasa de evaporación del agua del BSG. La tasa de evaporación es una magnitud que expresa la masa de agua evaporada por unidad de tiempo, es decir, la velocidad de secado del BSG. Este parámetro va a variar en el tiempo, ya que, cuanto más seca esté la biomasa y mayor contenido en humedad tenga el ambiente en el interior del invernadero, menor será la tasa de evaporación. Para diseñar el secadero, se realiza el cálculo de la cantidad de BSG que se podría secar en cada mes del año teniendo en cuenta la temperatura y humedad ambiente y las horas de sol que se tienen de media. Así, se estiman unas dimensiones del secadero para las cuales, la suma de la cantidad de BSG secado en cada mes del año es igual a la masa de BSG producida por la planta de cerveza.

Peletización

La peletización es un proceso de densificación por el cual se producen unos pellets con forma cilíndrica de entre 4 y 25 mm de diámetro y hasta 100 mm de longitud. De los beneficios de la peletización se pueden destacar entre otros el aumento de la densidad energética, la facilidad de manejo, la reducción de costes asociados al transporte y almacenamiento y la posibilidad de utilizar sistemas de alimentación automáticos (Stelte et al., 2011a; Stelte et al., 2011b). Sin embargo, este paso no es necesario si el sistema de alimentación está diseñado apropiadamente, y, además, supone una pérdida de material. Pese a todo, la peletización favorece la alimentación a los procesos de conversión y por ello será considerada en el presente capítulo.

El proceso de peletizado está formado por varias etapas: eliminación de impurezas, secado, molido, peletizado y enfriamiento. Comienza con la preparación de la materia prima. En primer lugar, se eliminan impurezas como piedras y otros residuos de gran tamaño. Posteriormente se realiza un secado del material en un secadero tipo tromel para pasar a la molienda donde se reduce el tamaño de partícula hasta los 6 mm. Con el material refinado se realiza el peletizado. Existen dos tecnologías de fabricación según el tipo de peletizadora utilizada (peletizadoras de matriz plana y peletizadoras de matriz cilíndrica). Sus principales características se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales características de las peletizadoras. (Arpi Trujillo et al., 2010; DFM, 2014; KMEC, 2021).

	Matriz Plana	Matriz anular
Precio	Bajo	Alto
Facilidad de uso	Fácil	Complejo
Producción	Baja (80 – 1.000 kg/h)	Alta (0,8 – 2 t/h)
Vida útil	Larga	Más corta
Eficiencia energética	Más baja	Más alta

Durante el peletizado la biomasa o el residuo se alimentan a una prensa de extrusión que empuja la biomasa contra una matriz perforada usando un rodillo. Gracias a la alta presión que se ejerce, la biomasa pasa a través de los canales de la matriz aumentando la temperatura. Con ellos, algunos componentes de la biomasa como las ceras se funden contribuyendo al aglomeramiento de las partículas y formando el pellet (Zafar, 2018). Por último, los pellets se enfrían y se ensacan.

Los requerimientos energéticos de la peletización dependen del material y de las condiciones del proceso, pero de forma genérica se puede asumir que para la producción de 1.000 kg de pellets son necesarios unos 3.000 MJ (Esteban Pascual, 2012).

Gasificación

De entre las diversas alternativas de aprovechamiento energético del bagazo de cerveza generado como residuo en la industria cervecera, la opción propuesta es su aprovechamiento por vía termoquímica mediante un proceso de gasificación. La principal ventaja de la gasificación respecto a otros procesos termoquímicos como la combustión es que la gasificación:

- a) Es un proceso más versátil, ya que el gas obtenido puede ser utilizado para diferentes fines, tales como producción de energía eléctrica, producción de H₂, síntesis de combustibles, etc.
- b) Presenta un mayor rendimiento energético en la producción de electricidad.

La gasificación es un proceso que puede llevarse a cabo utilizando diferentes tecnologías. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el tipo de reactor o gasificador utilizado condiciona de forma significativa distintos aspectos del proceso incluyendo la naturaleza del combustible a usar (biomasa, carbón, residuos) y las etapas de acondicionamiento previo (granulometría, secado, peletización, etc.), la capacidad de procesado del sistema, así como la composición y el poder calorífico del gas producto, la concentración de elementos contaminantes (alquitranes, partículas), y también los costes de inversión, de operación y mantenimiento (San Miguel, 2015). Existen diversos tipos de gasificadores utilizados a nivel comercial, cada uno de los cuales se basa en una tecnología concreta y está específicamente diseñado para operar de forma óptima en un rango determinado de condiciones (tipo de combustible, capacidad de procesado, temperatura de operación, etc.), tal y como se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de diseño y operación de distintos tipos de gasificadores. (San Miguel, 2015). Donde: LM=lecho móvil, lecho fijo; LFB=lecho fluidizado burbujeante; LFC= lecho fluidizado circulante; LA= lecho arrastrado

	LM/LF		LFB	LFC	LA
	Downdraft	Updraft			
Temperatura de operación (°C)	700-1.200	700-900	850 - 950	850-1.000	1.500
Control de proceso	Simple	Muy simple	moderado	complejo	moderado
Capacidad óptima (MWT)	0,2 - 5	5 - 20	1 - 20	> 20	> 100
Humedad máxima (% base húmeda)	25	60	40	40	15
Cenizas máxima (% base seca)	6	50	20	15	5
Tamaño partícula típico (mm)	40-100	10-250	– 10,0	1,0-10,0	0,1-1,0
Morfología del combustible	Uniforme	Heterogéneo	Molido	Molido	Pulverizado

Densidad aparente (kg/m ³)	> 500	> 400	> 100	> 100	> 400
Temperatura gas de salida (°C)	700	200-400	700	700	1.000
Contenido alquitranes (g/Nm ³)	0,015-3,0	30-150	1-2	1-2	0,01-0,05
Eficiencia de gas caliente (ηGC) (%)	75-80	80-85	80-90	80-90	85-90
Eficiencia de gas frío (ηGF) (%)	65-75	40-60	60-70	60-70	60-70
Presión típica de operación (bar)	1	1	1	20-70	20-70
Agente gasificante típico	Aire/agua	Aire/agua	Aire/agua	O ₂ /agua	O ₂ /agua
PCI del gas (MJ/Nm ³)	4,5-5,0	5,0-6,0	5,0-5,5	15-20	15-22
Aplicación del gas	Motor (electr.)	Térmica	Motor (electr.)	Turbina (electr.) + síntesis	Turbina (electr.) + síntesis
Temperatura de fusión de ceniza (°C)	> 1250	> 1000	> 1000	> 1050	< 1250

De forma general, los gasificadores más utilizados a nivel comercial se pueden distinguir en las siguientes categorías:

a) **Reactores de lecho móvil/fijo:** Los reactores de lecho móvil (en inglés, "*moving bed*"), también denominados como de lecho fijo (en inglés, "*fixed bed*"), son reactores que se caracterizan porque el combustible se alimenta por la parte superior creando un lecho continuo que se sustenta sobre una parrilla situada en la base del reactor.

En función del tipo de contacto que se produce entre el combustible y el agente gasificante y el sentido de la corriente de agente gasificante con respecto a la del combustible, podemos tener:

- Reactores "updraft", también denominados reactores en contracorriente o de flujo ascendente.
- Reactores "downdraft", conocidos también como reactores de corrientes paralelas o de flujo descendente.

Estos dos tipos de reactores son los más habituales dentro de la tecnología de lecho móvil/fijo. No obstante, también existen otras dos posibles configuraciones, como los reactores "crossfired", o de tiro cruzado y los reactores "double fired", o de doble tiro

b) **Reactores de lecho fluidizado:** Los reactores de lecho fluidizado se basan en el uso de un sólido que situado dentro del gasificador, actúa como lecho o medio de contacto entre el combustible y el agente gasificante. Dicho sólido (normalmente

arena) se mantiene en estado de suspensión (estado fluidizado) gracias al empuje del gas usado como agente gasificante. El uso de este sólido como lecho fluidizado favorece la mezcla entre reaccionantes, la transferencia de materia y energía el interior del reactor, lo que permite una mayor capacidad de procesamiento, consigue una mejor uniformidad térmica y hace que el sistema tenga una mayor estabilidad.

Debido a su enorme versatilidad, los reactores de lecho fluidizado son los más utilizados en gasificación a escala comercial, como por ejemplo, en el proceso Winkler. En los lechos fluidizados, el comportamiento fluidodinámico del sistema viene determinado por una serie de variables tales como el tipo y granulometría del sólido usado como lecho, la temperatura y presión de operación, etc. En función del estado fluidodinámico del sistema, podemos tener:

- Reactores de lecho fluidizado burbujeante (LFB ó en inglés, "bubbling fluidized bed", BFB), los cuales se caracterizan por trabajar con velocidades de paso del gas de entre 0,5-2,0 m/s.
- Reactores de lecho fluidizado circulante (LFC ó en inglés, "circulating fluidized bed", CFB), en los cuales se opera con una velocidad del gas de entre 4-10 m/s. Como ejemplo, este tipo de reactores de lecho fluidizado circulante son los más utilizados en sistemas de gasificación integrados en ciclo combinado (GICC).

c) **Reactores de lecho arrastrados:** Los reactores de lecho arrastrado (también conocidos por su denominación en inglés como "entrained flow") fueron desarrollados a partir de 1990 para la gasificación de carbón a gran escala. Al igual que los lechos fluidizados circulantes también son muy utilizados en centrales eléctricas de gasificación integrada en ciclo combinado (GICC).

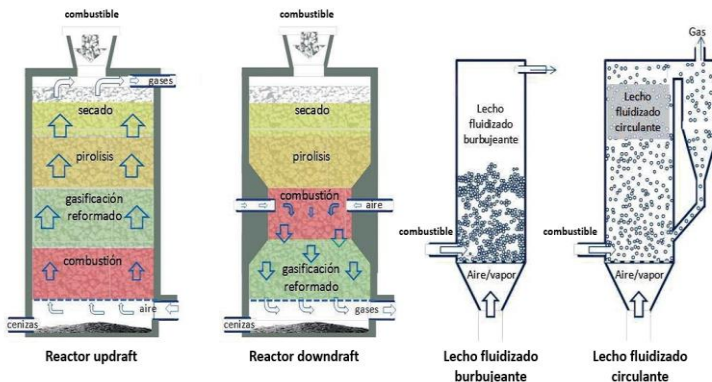


Figura 5. Ejemplos de diferentes tipos de gasificadores Fuente: (San Miguel, 2015).

3. Estudio de caso. Gasificación de BSG

Para la gasificación de BSG, se propone el uso de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante (LFB) a presión atmosférica. Este tipo de gasificador ha demostrado ser una tecnología madura, flexible y que está implementada a escala comercial (Higman et al., 2008; Sikarwar et al., 2016). La selección de esta tecnología se ha realizado en base a la escala de trabajo, la cual está determinada a su vez por la capacidad de producción de La Cibeles, las características del combustible a usar (BSG) y la aplicación final del gas generado que debe satisfacer parcialmente la demanda energética del proceso de producción en la propia industria cervecera. Además, teniendo en cuenta la disponibilidad de combustible y a fin de que la instalación de gasificación funcionara de forma continua durante todo el año, el gasificador debería tener un diámetro aproximado de unos 15 cm, y sería capaz de procesar un caudal de alimentación de unos 10 kg/h.

En un proceso habitual de gasificación con aire en lecho fluidizado burbujeante, y dependiendo de las condiciones experimentales (relación de equivalencia entre la cantidad de combustible y agente gasificante (ER), temperatura, material del lecho, capacidad de procesado o throughput, etc.), se puede obtener un gas de síntesis con un poder calorífico inferior de entre 4-8 MJ/Nm³_{d.b.} (Higman et al., 2008).

Actualmente apenas hay información en literatura sobre gasificación de BSG. De los pocos trabajos publicados al respecto, sin lugar a dudas uno de los más interesantes hasta la fecha es el realizado por Pérez et al. (2017). Estos autores han estudiado el proceso de gasificación del BSG con aire en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante a escala de planta piloto, y observaron en sus experimentos que la gasificación del bagazo puede realizarse sin problemas técnicos obteniendo un gas de síntesis con un poder calorífico medio (2,7-8,1 MJ / Nm³_{db}) y un bajo contenido en alquitranes. Sin embargo, debe hacerse notar que el trabajo de Pérez et al. presenta simplemente resultados preliminares ya que las condiciones de operación aún no están completamente optimizadas, por lo que la composición del gas está alejada del óptimo. Por ello, y a fin de evaluar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del bagazo vía gasificación, es necesario establecer unas condiciones de operación óptimas que sean realistas, estén suficientemente contrastadas experimentalmente y con las cuales se obtengan un gas combustible con un poder calorífico suficiente para que el proceso sea rentable desde todos los puntos de vista.

Para estudiar y analizar en profundidad el proceso de gasificación del bagazo de cerveza en la industria "La Cibeles", se ha realizado una serie de simulaciones utilizando un software de simulación de lechos fluidizados basado en el modelo de reactor de lecho fluidizado burbujeante propuesto por Kunii y Levenspiel (Kunii & Levenspiel, 2000), al cual se le han introducido una serie de correcciones para tener en cuenta la cinética de las diferentes reacciones que se producen en gasificación, y para lo cual se han usado las cinéticas planteadas por Wang y Kinoshita (Wang & Kinoshita, 1993). El resultado promedio obtenido en dichas simulaciones se resume en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la simulación del proceso de gasificación.

	Valor	Unidades
Caudal de alimentación	10	hg/h
Temperatura	850	°C
Throughput (TR)	550	kg/h·m ²
ER	0,30	-
Caudal de gas obtenido	355	Nl/min
Conversión	0,89	-
Composición del gas	355	% v/v
H ₂	12	
CO	18	
CO ₂	14	
CH ₄	4,0	
C ₂ H ₂	0,2	
C ₂ H ₄	1,0	
Poder Calorífico Inferior	6,2	MJ/Nm ³ _{bs}
Rendimiento a Gas	2,4	Nm ³ /kg
Energía	15	MJ/kg

Teniendo en cuenta unas condiciones de operación habituales en gasificación con aire a presión atmosférica (ER = 0,30, T = 850 °C y arena de sílice como material del lecho), los resultados de la simulación proporcionan un gas compuesto principalmente por H₂ (≈ 12% v/v), CO (≈ 18% v/v) y CO₂ (≈ 14% v / v), con un rendimiento a gas en torno a 2,4 Nm³_{b.s.}/kg BSG. Estos resultados han sido contrastados y corroborados: de dos formas distintas:

1) De forma teórica, comparando los resultados obtenidos en la simulación con los resultados obtenidos en las mismas condiciones usando, por ejemplo:

- el modelo simulación en ASPEN desarrollado por Nikoo (2008), que proporciona una composición de gas muy similar (11,7% H₂, 18,2% CO₂, 13,8% CO, 4,2% de CH₄ y 1,2% de C₂H₄) con un PCI ligeramente inferior (unos 5,9 MJ/ Nm³_{b.s.} en este caso).

- el modelo de Corella & Sanz (Sanz, 2006), que proporciona una composición del gas muy parecida y además estima que un contenido en alquitranes en el gas inferior a 4 g/Nm³_{b.s.}

2) Comparando dichos resultados obtenidos en la simulación realizada con los resultados experimentales disponibles en la literatura, tal y como se resume en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos en gasificación con aire de bagazo de cerveza y su comparación con otras biomásas de referencia (Ortiz et al., 2019)

Parámetro	Resultados de la simulación	Pérez et al. (2017)	Narvaez et al. (2017)	Toledo et al. (2006)	Arena et al. (2010)
Combustible	BSG	BSG	Astillas madera pino	deAstillas demadera pino	deBiomasa denatural
Humedad (%)	10	12	19-25	8,3	7,0
Cenizas (% p/p, base seca)	3,0	4,0	0,5-1,2	0,6	1,3
Condiciones de operación					
Temperatura	850	720-860	790-810	850	810-880
ER	0,30	0,16-0,25	0,26-0,47	0,30	0,23-0,28
Composición del gas (% v/v)					
H ₂	12	2,1-3,6	7,0-9,5	13,4	12
CO	18	7,4-13	10-18	21	17-18
CO ₂	14	12-13	12-15	12	14-16
CH ₄	4,0	2,0-13	2,4-4,5	4,5	3,9-5,0
C ₂ H ₂	0,2	0,2-0,4			0,08
C ₂ H ₄	1,0	1,0-2,4	1,1-2,3	2,0	0,8-1,2
C ₂ H ₆		0,04-0,4			0,04-0,17
Rendimiento a Gas (Y _{gas} , Nm ³ _{bs} /kg _{BSG})	2,4	1,8-2,4	2,1-2,5	2,2	1,8-2,1
Poder Calorífico Inferior (PCI, MJ/Nm ³ _{bs})	6,2	2,7-8,1	3,7-6,6	7,0	5,9-6,8
Energía producida (MJ/kg _{BSG})	15	6,4-15	9,9-13	15	11-14

Tal y como se ha comentado anteriormente, existen muy pocos trabajos publicados hasta la fecha en el campo de la gasificación usando bagazo como combustible. Sin

embargo, si existe una gran multitud de trabajos publicados utilizando madera de pino como combustible en procesos de gasificación con aire en lecho fluidizado, tanto a escala laboratorio como a escala comercial, razón por la cual la madera de pino se usa en muchas ocasiones como biomasa de referencia a la hora de comparar procesos. Por ello, y teniendo en cuenta que el bagazo de cerveza, una vez secado y peletizado, presenta unas características muy similares a las astillas de madera de pino, tanto en su composición, contenido en carbono fijo y fracción volátil, y que el comportamiento de ambos combustibles en un análisis termogravimétrico (TGA) también es muy similar, se puede asumir que el comportamiento del bagazo en gasificación debe ser similar al observado con las astillas de madera de pino. De ahí, que los resultados obtenidos en la simulación de la gasificación del bagazo puedan ser comparables a los resultados experimentales publicados por otros autores en procesos de gasificación con aire usando madera de pino.

Así pues, en conclusión, una vez aceptados los resultados de la simulación, se puede concluir que el proceso de gasificación con aire del bagazo de cerveza aplicado se puede generar un gas de síntesis con un poder calorífico inferior de $PCI=6.2 \text{ MJ/Nm}^3_{b.s.}$. A partir de dicho gas de síntesis, la cantidad de energía que se puede obtener es de unos 15 MJ/kg de combustible, energía que se puede utilizar en los cubrir parcialmente las necesidades energéticas de la propia industria cervecera, reduciendo de esta forma la demanda energética de la instalación.

3.1. Sistemas de acondicionamiento del gas de síntesis

Debido al proceso de gasificación y a las características fisicoquímicas del BSG, el gas de síntesis producido contiene partículas en suspensión (cenizas o inquemados), alquitranes, compuestos alcalinos, NH_3 , y compuestos sulfurados y clorados. Estos contaminantes han de ser eliminados antes del uso del gas para evitar problemas en los equipos de conversión del gas y emisiones contaminantes a la atmósfera.

En el marco europeo existen una serie de normativas que regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera, limitando principalmente las emisiones de óxidos de nitrógeno y de azufre (Parlamento Europeo, 2001). Por otro lado, el contenido en cloro del BSG que está en torno a $0,04 \%$ en peso en base seca puede provocar la emisión de ácido clorhídrico y compuestos orgánicos clorados, altamente peligrosos para la salud y el medioambiente (Corella et al., 2008). Para la eliminación de estos contaminantes, se diseñan dos sistemas, el primero enfocado a la eliminación de partículas y otro para la eliminación del resto de contaminantes del gas.

Eliminación de partículas sólidas

Por las propias características técnicas de un lecho fluidizado, junto con la corriente de gas generado pueden ir arrastradas también partículas sólidas, bien procedentes de la arena silíceo utilizada como lecho, o bien de las propias cenizas del bagazo de cerveza. En cualquier caso, para eliminar estas partículas sólidas de la corriente gaseosa es necesaria la instalación de un sistema de eliminación de partículas a la salida del gasificador. De entre los sistemas que se pueden emplear destacan los

ciclones. En ellos, el gas se somete a altas velocidades y a un flujo helicoidal que dirige las partículas sólidas hacia el fondo de un contenedor troncocónico mientras que el gas limpio sale por la parte superior del mismo. Entre las ventajas que ofrecen los ciclones se pueden destacar, el bajo coste de instalación y mantenimiento y la posibilidad de operar con gases a alta temperatura.

Eliminación de otros contaminantes

Para eliminar alquitranes y otros contaminantes del gas de síntesis obtenido en el gasificador, es necesario la implementación de un sistema de limpieza o acondicionamiento del gas. De las posibles alternativas existentes, los scrubbers o lavadores de gases son una de las formas más económicas y sencillas de conseguir eliminar la mayoría de los contaminantes haciendo que no se emitan en la posterior combustión del gas (Balas et al., 2014).

Un scrubber es un sistema de lavado en el que se da un proceso de absorción, es decir, se pone en contacto una fase gaseosa y una fase líquida y las especies que tienen afinidad por el disolvente pasan de una fase a otra. No obstante, en un scrubber tipo Venturi se favorece la transmisión de materia poniendo en contacto la fase gaseosa con el disolvente, en este caso agua, y sometiendo esta corriente a una importante aceleración. Un aumento de velocidad aumenta significativamente la turbulencia favoreciendo procesos de intercambio de materia. De esta forma, una importante parte de los contaminantes contenidos en el gas pasan a la fase acuosa. Posteriormente, la corriente se hace pasar por un separador ciclónico que permite decantar las gotas de líquido de la corriente gaseosa.

Un scrubber tipo Venturi se caracteriza por ser una tecnología madura, tener una alta eficacia para pequeñas partículas, y un bajo coste de instalación y de mantenimiento (Boll, 1973). La utilización de agua como disolvente para el lavado simplifica el proceso y permite la eliminación de partículas sólidas de pequeño tamaño que no han quedado retenidas en el ciclón y compuestos como NH_3 , HCl o H_2S . Esta etapa de lavado se realiza después del enfriamiento previo para que la corriente alimentada al scrubber tenga una temperatura adecuada y pueda aprovecharse el calor que porta dicha corriente.

3.2. Sistemas de generación de potencia térmica

En el proceso productivo de la cerveza existen diferentes etapas que necesitan un aporte externo de energía en forma de calor, por lo tanto, es interesante aprovechar el calor generado durante la gasificación para producir vapor de proceso que se aprovechará principalmente en la etapa de ebullición.

La recuperación de calor se puede realizar a través de un intercambiador de calor. En el caso propuesto, esta recuperación se puede aplicar en dos lugares diferentes. En primer lugar, se puede recuperar calor del gas de síntesis generado en la gasificación antes de entrar en la etapa de lavado y en segundo lugar se puede recuperar el calor de los gases generados en la combustión.

Primer sistema de generación

Para el diseño de un intercambiador de calor, un generador de vapor en este caso, se debe considerar las características del gas generado (caudal, composición, temperatura de salida del reactor, etc.). Como el primer sistema de recuperación de calor se va a instalar antes del scrubber de limpieza, el gas tendrá cierto contenido en alquitrán, por lo que, al ser un fluido sucio es éste el que debe ir por tubos siendo su factor de ensuciamiento bastante alto. Para el gas se considera un factor de ensuciamiento de 0,01 m²k/W para el gas de síntesis y de 0,0005 m²k/W para el agua. En cuanto a la temperatura, se fija una diferencia de temperatura mínima de 25 °C entre el fluido caliente y frío. Sin embargo, al tener una diferencia de temperatura muy alta, se espera que el área de intercambio sea bastante pequeña, por lo tanto, se propone un evaporador de tipo serpentín, de un único tubo en forma de espiral por el que pasa el gas, aunque otras alternativas pueden resultar igual de efectivas.

Con esta etapa de aprovechamiento del calor generado en la etapa de gasificación no sólo se consigue generar vapor aprovechable en la propia planta y conseguir una reducción en el consumo de gas natural, sino que además se enfría el gas de síntesis hasta una temperatura a la que es posible realizar la etapa de lavado. Con las especificaciones dadas el gas de síntesis abandona el intercambiador de calor a una temperatura de unos 200 °C.

Segundo sistema de generación

Como se describe en el apartado siguiente, el gas de escape del motor de combustión, sale a una temperatura cercana a los 600 °C y un caudal casi dos veces superior al que se tenía de gas de síntesis. Además, ahora el componente principal del gas es el nitrógeno debido al aire alimentado en la combustión. Por lo tanto, se puede utilizar un nuevo generador de vapor similar al calculado previamente con los mismos objetivos: producir vapor de baja presión aprovechable en el proceso productivo y reducir la temperatura de los gases de escape para una emisión segura a la atmósfera.

3.3. Sistema de generación de potencia eléctrica

El gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación es una fuente de energía térmica debido a la alta temperatura del proceso en el que se forma. Sin embargo, la presencia de H₂, CO y CH₄ hace que aún tenga un poder calorífico considerable, por lo tanto, se requiere de un método para llevar a cabo la oxidación completa a dióxido de carbono y agua.

Para la escala de trabajo de la instalación diseñada existen dos alternativas principales para la generación de potencia eléctrica: microturbinas de gas y motores de combustión interna. Realizando una pequeña comparativa económica y realizando

una estimación de la potencia consumida, un motor de combustión interna o motogenerador resulta la mejor opción tanto económica como energéticamente. Esta elección está basada principalmente en el coste de los equipos ya que, una turbina de gas requiere una inversión muy elevada y no se mejora el rendimiento de un motor de combustión interna. El motor de combustión interna aprovecha el poder calorífico del gas de síntesis para mover una serie de pistones que hacen girar un eje conectado a un generador eléctrico.

3.4. Aplicación para la Industria “La Cibeles”

Como ejemplo de revalorización energética del BSG, se ha tomado como referencia la empresa “La Cibeles”. Esta pequeña industria de cerveza artesanal situada en la zona sur del área metropolitana de Madrid (España) tiene una producción anual de 1.512 m³ de cerveza (datos del año 2020) y genera aproximadamente 300 toneladas anuales de BSG que actualmente carece de aprovechamiento económico. Con idea de cubrir parcialmente las necesidades energéticas de la planta de fabricación y reducir al mínimo los residuos generados se procede a aplicar el proceso de revalorización señalado anteriormente (preparación del residuo, gasificación, acondicionamiento del gas y recuperación de energía térmica y eléctrica).

Para el pretratamiento de las 300 ton de BSG anuales que produce la empresa se diseña un secadero solar anexo a las instalaciones de la cervecera de 14 x 14 metros y 3,5 metros de alto, teniendo en cuenta que los aleros del tejado se colocan con una inclinación de 40,35° respecto de la horizontal, con aberturas en la parte superior para permitir la renovación del aire en el interior y se considera una peletizadora de matriz plana por las ventajas que ofrece. Con esta etapa de pretratamiento se consigue el secado del BSG hasta valores de humedad ligeramente inferiores al 10 % y se reduce su masa en más de un 70 %, pasando a unos 80.000 kg aproximadamente. La etapa de revalorización energética se ha diseñado teniendo en cuenta la disponibilidad de combustible y a fin de que la instalación de gasificación funcionara de forma continua durante todo el año. Por ello se ha considerado un gasificador LFB con un diámetro aproximado de 15 cm y que sería capaz de procesar un caudal de alimentación de unos 10 kg/h. Por último, se han considerado dos equipos para el acondicionamiento del gas de síntesis: un ciclón y un scrubber tipo Venturi a fin de obtener un gas con la pureza necesaria para permitir su utilización en un motor de combustión y producir así electricidad. Con este sistema se estima que se pueden producir aproximadamente 12 kW eléctricos de potencia aprovechable, por ejemplo, en el sistema de refrigeración necesario después de la etapa ebullición y centrifugación en la producción de cerveza. Además, para aprovechar los flujos de calor de la instalación se han diseñado dos sistemas de recuperación de energía térmica mediante la instalación de dos intercambiadores, uno a la salida del gasificador y otro a la salida del motor de combustión.

Sumando la energía producida por los generadores de vapor y el motogenerador, la planta de cogeneración diseñada debería ser capaz de producir unos 12 kW eléctricos y unos 12 kW térmicos, que equivale a unos 100 MWh de energía eléctrica y

Tabla 8. Costes de inversión, mantenimiento y operación (Fuente: Rebollo González, 2020).

Equipo	Coste De Los Equipos (€)	Coste Operación Y Mantenimiento (€/Año)
Secadero	8.000 €	114 €
Silo	4.900 €	22 €
Unidad de gasificación	110.000 €	1.810 €
Intercambiadores de calor (2x)	1.146 €	85 €
Lavador de gas	2.030 €	58 €
Motor de combustión	3.275 €	628 €
Tubería	1.348 €	50 €
Control	2.939 €	
TOTAL	134.784 €	2.852 €

Observando los resultados de la Tabla 8 se obtiene que la inversión estimada es de aproximadamente 135.000 € con unos costes anuales asociados a mantenimiento y operación de 2.850 €.

Con estos datos, el siguiente paso es el cálculo del ahorro monetario que supone la energía producida en la planta de cogeneración. Para el cálculo de este ahorro es necesario remitirse a los datos de las facturas del consumo de electricidad y gas natural y hallar un coste medio del kWh, de esta manera se puede realizar una estimación del ahorro que se puede conseguir.

Tabla 9. Cálculo del ahorro económico.

POTENCIA 1º Intercambiador (kW)	6,6
POTENCIA 2º Intercambiador (kW)	5,4
POTENCIA Motor de combustión (kW)	12
Energía térmica producida (kWh/año)	96.528
Energía equivalente GN (kWh/año)*	107.253
Precio del gas natural (€/kWh)	0,044
Energía eléctrica producida (kWh/año)	95.480
Precio de la electricidad 2019 (€/kWh)	0,13
AHORRO ECONÓMICO	16.687 €

**Para el cálculo de la potencia térmica equivalente en gas natural se ha supuesto una caldera con un rendimiento del 90 %.*

De acuerdo a los datos de la planta diseñada, los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 9. A partir de esos datos se observa la implementación de la planta de gasificación propuesta para el aprovechamiento energético del bagazo generado en la industria cervecera "La Cibeles" supondría un ahorro en el consumo anual de 95,5 MWh eléctricos y 107 MWh de gas natural, lo que implica un ahorro energético en la industria estudiada del 26,5 % en consumo eléctrico y del 19 % del consumo térmico aportado vía gasóleo o gas natural. Teniendo en cuenta el coste promedio de la energía en el año 2019, esta reducción de la demanda energética se traduce en un ahorro económico global de 16.700 € anuales para la empresa "La Cibeles".

Teniendo en cuenta la inversión calculada previamente y el ahorro monetario anual, se estima un periodo de retorno simple de unos 8 años. Por lo tanto, es un proceso que resulta rentable económicamente.

3.6. Estudio de impacto ambiental

La implementación de una planta de revalorización energética de un residuo de este tipo en una zona industrializada puede tener diferentes impactos en el medio ambiente entre los que destacan la emisión de humos y la emisión de contaminantes a la atmósfera. Existen otros tipos de impactos pero que no tienen una repercusión importante en una zona industrial como los ruidos generados por los compresores y el motor, el movimiento de tierras para su construcción o el impacto paisajístico.

El BSG empleado, contiene cantidades más o menos importantes de nitrógeno, azufre y cloro, las cuáles si no se eliminan con sistemas de lavado pueden emitirse a la atmósfera y producir problemas de corrosión en los equipos de la instalación, estos compuestos se encuentran en forma de NH_3 , H_2S y HCl . Para evitar que estos compuestos lleguen al aire se instala un scrubber tipo Venturi en el que el gas de síntesis que se forma en el proceso de gasificación se pone en contacto con una fase fluida, agua en este caso, que es capaz de absorber estos gases y evitar su emisión. Por otro lado, los humos generados en el motor están compuestos principalmente por CO_2 y H_2O y son enfriados en un intercambiador antes de su emisión. Por lo tanto, se han puesto medidas para los impactos negativos que pueda ocasionar la instalación de revalorización. El grupo electrógeno cuenta con su propio sistema catalítico para evitar la emisión de inquemados y NO_x .

Por otro lado, es necesario destacar los aspectos medioambientales positivos de instalar una pequeña central térmica de biomasa. Primeramente, se deja de tener un residuo que actualmente ocupa una cantidad de espacio importante y que suele acabar en un vertedero. Se emplea este residuo como materia prima para la generación de un gas combustible que en una instalación de cogeneración sirve tanto para la generación de calor de proceso como de electricidad. De esta forma, se consiguen ahorrar en torno a 100 kWh eléctricos y otros tantos térmicos. Realizando unos pequeños cálculos, se estima la cantidad de CO_2 que se deja de emitir a la atmósfera, tanto en la combustión de gas natural como en la generación eléctrica atendien-

do al mix energético actual. Los datos de emisiones en España en el año 2019 son de 0,203 kg CO₂/kWh de gas natural y 0,27 CO₂/kWh eléctrico.

Tabla 10. Reducción de emisiones.

	Gas natural (MWh/año)	Electricidad (MWh/año)	Emisiones CO ₂ /kWh (t)
Situación inicial	561	360	211
Situación futura	454	264	163
Ahorro	107	95	48

Según los resultados mostrados en la Tabla 10 con la premisa que el CO₂ producido a partir de biomasa es asimilable por el medio y se consideran emisiones nulas, con la instalación de la planta de revalorización se consigue que se dejen de emitir 47,5 toneladas anuales de CO₂, lo que supone un ahorro del 22,5 % de las emisiones. Es decir, es un proceso medioambientalmente muy favorable.

4. Conclusiones del estudio

El estudio presentado muestra una aplicación de economía circular en una planta cervecera. En él, se propone la valorización energética de uno de los residuos mayoritarios de la fabricación de cerveza, el bagazo de cerveza, mediante su gasificación y utilización del gas producido en un motor de combustión. Tomando como caso de partida los datos reales tanto de producción como de requerimientos energéticos proporcionados por la empresa "La Cibeles" se describen cada uno de las etapas necesarias, desde el pretratamiento del residuo hasta la obtención de electricidad y calor aprovechable en el proceso y se demuestra que el proceso es energéticamente rentable al disminuir el consumo externo de energía, reducir las emisiones asociadas a la misma y convertir un residuo en una fuente de energía limpia.

Con la instalación de cogeneración diseñada para el caso de la fábrica "La Cibeles" se consigue una reducción de costes en electricidad (26,5 %) y en gas natural (19,1 %) lo que supone un ahorro a la empresa de más de 16.000 € al año.

Además, también se consigue una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de un 22,5 %.

5. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

El trabajo presentado permite extraer aprendizajes y recomendaciones de buenas prácticas que deben ser mencionadas y entre las que se destacan las siguientes:

- Sobre el diseño de procesos más respetuosos con el medioambiente, la sociedad y sus individuos:

-
- a) Los procesos industriales generan residuos que pueden ser revalorizados como recurso para generación de energía térmica y eléctrica sustentable, evitando así su disposición en vertedero y alineándose con procedimientos de producción sostenible, simbiosis industrial y economía circular.
 - b) Mediante el aprovechamiento energético de los residuos generados por las propias industrias, en muchas ocasiones asimilables a biomásicos, se puede contribuir a disminuir el uso y consumo de energía fósil, mitigando las emisiones asociadas de dióxido de carbono o disponer de una fuente de energía, allá donde no la hay, por ejemplo, en sistemas aislados no conectados a red. Además, la energía procedente de los residuos puede ser considerada como renovable y se produce con recursos autóctonos.
 - c) El concepto se ha particularizado y ejemplificado para un sector industrial concreto, el de producción de cerveza, y una localización determinada, pero la aproximación propuesta es universal, extrapolable a cualquier región y país de Iberoamérica, y aplicable a un amplio espectro de residuos: agroalimentarios, agroindustriales, industrias de la madera, papel y celulosa, etc.

- Sobre el caso de estudio:

El ejemplo presentado en este capítulo está condicionado por una serie de factores que dependen principalmente de la localización de la planta. Estos factores pueden ser limitaciones o ventajas según cada caso:

- d) El caso diseñado está dirigido a pequeñas y medianas empresa en cuyo proceso productivo se genere un residuo que siga teniendo un potencial energético importante, como es el caso del bagazo de cerveza. Para grandes plantas, existen otras alternativas que son más económicas como el tratamiento biológico de los residuos.
- e) Se ha proyectado un sistema de secado empleando un secador de tipo invernadero. Esta tecnología es recomendable en climas cálidos en los que gracias únicamente a la radiación solar es posible secar una cantidad importante de biomasa. Además, estos secadores necesitan un área disponible importante. Si se dispone del terreno es una alternativa barata y eficiente. Sin embargo, si el clima no es apropiado o no se dispone del terreno necesario, deben plantearse otras alternativas para el secado como puede ser el aprovechamiento de parte del calor generado en la planta.
- f) La gasificación es una tecnología versátil, es decir, permite la conversión de distintos tipos de biomasa de distinto origen, por lo tanto, es posible la colaboración entre distintas empresas para la implantación de unas instalaciones comunes. Un aumento en la capacidad de la planta aumenta la rentabilidad pudiendo producir energía para más de una fábrica que se encuentren relativamente cerca. Otra alternativa es liberar a otras empresas de sus propios residuos para que puedan ser aprovechados en la planta de cogeneración, de esta manera aumenta la rentabilidad de la planta y se libera a otra fábrica de sus residuos no deseados.

-
- g) Se ha considerado un sistema de producción continuo para una capacidad baja. Una forma de aumentar la rentabilidad de la planta sin la necesidad de aumentar la inversión es realizar una optimización de los tiempos de operación. Por ejemplo, en países en los que existe una discriminación del precio de la energía eléctrica, véase España, se debe realizar un estudio en el que se tengan en cuenta las horas de mayor coste de la electricidad (horas pico) y sincronizar la operación del sistema de cogeneración con estos periodos de alto coste de la energía. De esta manera, se aumenta directamente el ahorro económico y la rentabilidad de la planta.
- h) Se debe analizar si existe posibilidad de hibridar con otras fuentes de energía renovable, solar, eólica. Éstas son intrínsecamente de naturaleza discontinua, gestionable vía acumulación por ejemplo en baterías. La producción de gas combustible a partir de residuos es en sí misma gestionable, se puede producir a demanda y el gas generado se puede acumular en depósitos. De esta manera la generación de energía a partir del residuo permite disponer de un sistema de respaldo a usar en el momento que se necesite.
- i) Una de las principales ventajas de la solución sugerida es su carácter medioambiental. Una planta de este tipo produce un efecto positivo en la aceptación social de la marca, lo que se traduce en publicidad positiva que puede ser explotada por el empresario, por lo tanto, aunque existe un ahorro económico, las posibilidades son mayores, pero no entran dentro del alcance de este capítulo.

- Sobre consideraciones económicas y legislativas:

Para que ejemplos como el caso de estudio presentado sean una inversión más atractiva son necesarios unos incentivos económicos y un marco de normativas bien definidos. Se pueden plantear una serie de acciones y requisitos:

- j) Existencia de mecanismos de financiación y ayuda, las cuales serán específicas en cada país. Así, en España se puede acceder a varios programas de subvención pública a fondo perdido o bien mediante inversiones financieras, para la implementación de energías renovables tanto a nivel nacional como europeo. Dichas ayudas las gestiona el Instituto para el Ahorro y la Diversificación Energética (IDAE), del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion>. Ello constituye un impulso de actuaciones y proyectos a las empresas que favorecen la sostenibilidad, impulsando el ahorro y la eficiencia energética, la utilización de energías renovables o el desarrollo de una economía baja en carbono.
- k) La definición y articulación de directivas, planes climáticos y programas concretos incentiva y en ocasiones obliga a las empresas a la adaptación de sus procesos productivos, de manera que sean más sostenibles. Por citar los más relevantes, en España son de aplicación directa a casos como el de este trabajo: el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, que define los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, de penetración de energías renovables y de eficiencia energética, el proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, aprobado en mayo de 2021 por el Estado español,

el Paquete de Economía Circular de la Unión Europea, UE, 2 Dic. 2015 para impulsar la competitividad, crear empleo y generar crecimiento sostenible o las Directivas (UE) 2018/850 y 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, que modifican la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Consejería de Educación e Investigación de la Comunidad Autónoma de Madrid por el apoyo económico recibido para la realización de los programas RETOPROSOST (P2013/MAE-2907) y RETOPROSOST-2 (P2018/EMT-4459), dentro de los cuales se desarrolla el trabajo aquí presentado. Además, los autores también expresan su profundo agradecimiento a la empresa "La Cibeles, S.L." y, en particular, a su fundador David Castro, por su colaboración desinteresada y la aportación de la información necesaria para la realización de este estudio.

Referencias

- AINIA. (2019). Centro Tecnológico. Mejores técnicas disponibles en el sector cervecero. Recuperado de: [https:// https://www.ainia.es/](https://www.ainia.es/)
- Amos, W. A. (1998). Report on Biomass Drying Technology. Colorado, U.S.
- Arpi Trujillo, J. E., & Calderón Toral, C. S. (2010). Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la Ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético. (Ingeniero Mecánico), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/832>
- Balas, M., Lisy, M., Skala, Z., & Pospisil, J. (2014). Wet scrubber for cleaning syngas from biomass gasification. *Advances in Environmental Sciences, Development and Chemistry*, 195-201.
- Boll, R. H. (1973). Particle Collection and Pressure Drop in Venturi Scrubbers. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 12(1), 40-50. doi:10.1021/i160045a008
- Brewers Association. Solid Waste Reduction Manual. Recuperado de: https://www.brewersassociation.org/attachments/0001/1529/Sustainability_Manual_Solid_waste.pdf
- Cerveceros de España. (2019). Memoria de sostenibilidad ambiental del sector cervecero. Madrid, España:
- Contreras, M. L., Bahillo Ruíz, A., & Sánchez, J. M. (2020). Sección II: Tecnologías de biomasa. En: Recursos, tecnologías, transferencia y políticas: una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía en Iberoamérica. Manrique S, Torreiro Villariño Y, Contreras Rodríguez ML, Sánchez Hervás JM, Garrido S, Curbelo Alonso A. (Editores) (2020). ISBN 978-84-15413-32-5. CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). Madrid, España. <http://www.cytmed.org/es/biblioteca/primer-libro-de-la-red-rebibir-t>

-
- Corella, J., Toledo, J. M., & Molina, G. (2008). Performance of CaO and MgO for the hot gas clean up in gasification of a chlorine-containing (RDF) feedstock. *Bioresour Technol*, 99(16), 7539-7544. doi:10.1016/j.biortech.2008.02.018
- Directiva 2001/80/CE (2001) del Parlamento Europeo y del Consejo sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.
- DFM. (2014). Cómo se fabrican los pellets. Recuperado de: <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/como-se-fabrican-los-pellets.html>
- Duch Guillot, J. (2021). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201ST005603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,de%20os%20productos%20se%20extiende>.
- Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., & Farhat, A. (2015). Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*, 77, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.090>
- Esteban Pascual, L. S. (2012). Fuel Preparation. Paper presented at the Summer School: Advanced concepts and process schemes for CO2 free fluidised and entrained bed co-gasification of coals, Madrid, Spain. Oral presentation
- European Commission. (2017). The role of waste-to-energy in the circular economy. Recuperado de: <http://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>
- European Environment Agency. (2016). Circular economy in Europe. Developing the knowledge base (ISBN 978-92-9213-719-9 ISSN 1977-8449). Retrieved from Luxembourg: <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>
- Higman, C., & Burgt, M. v. d. (2008). *Gasification* (2nd Edition ed.): Gulf Professional Publishing.
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1), 17-46. doi:10.1016/S0378-3820(97)00059-3
- Kawa, A., & Łuczyk, I. (2015). CSR in Supply Chains of Brewing Industry. In P. Golińska & A. Kawa (Eds.), *Technology Management for Sustainable Production and Logistics* (pp. 97-118). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- KMEC. (2021). Diferencias entre matriz plana y anular. Recuperado de: <http://www.plantaspeletizadoras.com/diferencias-matriz-plana-anular.html>
- Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2006). Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: An experimental validation. *Solar Energy*, 80(9), 1135-1144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.011>
- Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275. doi:10.1002/jsfa.6486

-
- Nikoo, M.B., Mahinpey, N. (2008). Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS. *Biomass & Bioenergy*. 32, 1245 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.020>
- Olajire, A. A. (2020). The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*, 256, 102817. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>
- Ortiz, I., Torreiro, Y., Molina, G., Maroño, M., & Sánchez, J. M. (2019). A Feasible Application of Circular Economy: Spent Grain Energy Recovery in the Beer Industry. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3809-3819. doi:10.1007/s12649-019-00677-y
- Pérez, V., Murillo, J. M., Bados, R., Esteban, L. S., Ramos, R., & Sánchez, J. M. (2017). Preparation and gasification of brewers' spent grains. Paper presented at the 5th International Conference on Sustainable Solid Waste, Athens, Greece.
- Rebollo González, I. (2020). Proyecto de Economía Circular en la Industria Cervecera. (Grado en Ingeniería de la Energía, Trabajo Fin de Grado), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.
- Rodero, M. (2020). El Covid-19 pone en jaque al sector cervecero. Recuperado de: <https://www.alimarket.es/alimentacion/noticia/318692/el-covid-19-pone-en-jaque-al-sector-cervecero>
- San Miguel, G. (2015). Capítulo 7. Introducción a la química y a la tecnología de gasificación de biomasa. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 978-84-8476-674-2.
- Sanz, A., Corella, J. (2006). Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. Results from a pseudo-rigorous 1-dimensional model for stationary state. *Fuel Process. Technol.* 87(3), 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.08.003>.
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Fennell, P. S. (2016). An overview of advances in biomass gasification. *Energy & Environmental Science*, 9(10), 2939-2977. doi:10.1039/C6EE00935B
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, L., & Henriksen, U. B. (2011a). Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass & Bioenergy*, 35(11), 4690-4698.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S. r., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011b). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285-3290.
- THERCHEM. (2016). Biogás a partir de desechos de cervecería. <https://cordis.europa.eu/article/id/150909-biogas-from-brewery-waste/es>
- Zafar, S. (2018). Biomass Pelletization Process. *BioEnergy*. Consult website: <https://www.bioenergyconsult.com/biomass-pelletization/>
-



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso XVII, 2021: 355-370
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO XVII. Redes de calefacción alimentadas con biomasa y su aplicación en municipios rurales: Caso Cuéllar, Segovia (España)

María Luisa Contreras, Alberto Bahillo, José María Sánchez

Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible, CIEMAT, Madrid, 28040, España.

Resumen. La Red de Calor por Biomasa de Cuéllar, constituye la primera red de calor de carácter institucional funcionando con biomasa forestal en España. El proyecto, impulsado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), seleccionó este municipio segoviano para esta actuación pionera, debido a la gran masa forestal que lo rodea y al importante apoyo del Ayuntamiento de Cuéllar y de la Junta de Castilla y León. Su funcionamiento ha demostrado significativamente que se genera energía suficiente para todos los usuarios conectados, eliminándose los gastos de mantenimiento e incrementándose la comodidad en el servicio. El estudio del proceso determinó un rendimiento térmico total del 60%, justificándose su viabilidad técnica y económica respecto a otros combustibles tradicionales. El funcionamiento de esta red de calor supone además una disminución de 1.580 toneladas de CO₂ al año. Su gran contribución medioambiental a la producción de energía, además de las ventajas sociales y desarrollo de actividades alternativas en zonas agrícolas y forestales, hacen que esta instalación sirva de modelo para su desarrollo en otras poblaciones con potencial de biomasa. A la pionera red de Cuéllar, se han unido instalaciones repartidas por once comunidades autónomas de la Península. En los últimos años, los District Heating están siendo apoyados por distintas administraciones, tanto a nivel europeo como a nivel regional y municipal, por ser una solución más eficiente energéticamente que cualquier otra solución de producción de energía térmica que permite, además, la incorporación de fuentes de energía renovables a gran escala.

*Correspondencia: M.L. Contreras. E-mail: mluisa.contreras@ciemat.es

1. Introducción

1.1. Redes de Calor Centralizadas (District Heating)

Una Red de Calefacción Centralizada o District Heating es un sistema de suministro de agua caliente sanitaria y calefacción (y en algunos casos también refrigeración) a distintos edificios a partir de una planta central. El calor producido en dicha planta se entrega a los usuarios para su consumo mediante una red de tuberías enterradas. Estos sistemas varían tanto en las fuentes energéticas utilizadas como en tamaño, pudiendo cubrir desde un pequeño número de casas hasta áreas metropolitanas completas (Cantalejo, 2001; ESEN, 2010).

Las redes de calefacción son sistemas con una larga tradición en países como Estados Unidos y los del centro y norte de Europa (en Dinamarca y Suecia cubren la mitad de las necesidades de calefacción del país). En los últimos tiempos han experimentado un gran impulso gracias a la reducción de costes que suponen frente a las alternativas no centralizadas y las innegables ventajas medioambientales que proporcionan en el entorno urbano (Cantalejo, 2001; IDAE, 2007).

En muchos casos se aprovecha el calor residual de centrales termoeléctricas, mejorando notablemente su eficiencia energética. Gracias a este sistema las centrales danesas llegan a un aprovechamiento cercano al 70% de la energía consumida, cuando en una central convencional el rendimiento apenas alcanza el 30%.

El sistema District Heating consta de los siguientes componentes:

- La central térmica
- La red de distribución
- Las subestaciones de transmisión térmica en los edificios

• **Central térmica**

Las tipologías de la central térmica varían en función de la tecnología de generación, así como de las fuentes energéticas utilizadas. La central térmica puede funcionar a partir de gas, biomasa u otros combustibles.

La planta térmica se suele situar en una construcción exclusiva para su uso. En este lugar se ubican todos los elementos y maquinaria necesarios para la generación de calor, así como los grupos de bombeo utilizados para la impulsión del fluido calportante hasta los distintos puntos de consumo.

La central térmica funciona de modo automatizado, en función de la demanda. Las variaciones en la demanda son detectadas por el sistema de control, basado en controladores digitales situados en la central y en cada una de las subestaciones térmicas de los distintos edificios

• **Red de distribución**

Una vez generada el agua caliente se procede a su distribución hasta los diferentes edificios por medio de una red de tuberías preaisladas que evitan las pérdidas de calor.

La línea de transporte de calor consta de dos conducciones, una para la ida y otra para el retorno. En el caso de redes de Calefacción y Refrigeración Centralizada (District Heating & Cooling) la línea consta de cuatro conducciones.

En las promociones urbanísticas de nueva construcción, el sistema District Heating reduce el coste de ejecución de la obra civil, ya que la red de distribución de agua caliente sustituye a la red de distribución de gas y aprovecha las zanjas de la red de abastecimiento de agua.

La tubería preaislada está constituida por un tubo portador fabricado en acero al carbono, un aislamiento térmico de poliuretano y una envolvente exterior de polietileno que la protege de la corrosión electrolítica.

Este sistema de conducción presenta una serie de ventajas frente a las tuberías aisladas en obra por el método tradicional:

- Mínimas pérdidas térmicas.
- Rapidez de montaje y menor mano de obra.
- Larga vida útil y mínimo mantenimiento.
- Amplia gama de dimensiones y accesorios.
- Tubería rígida o flexible.
- Detector de fugas en la red con precisión de $\pm 1\text{m}$.

• **Subestaciones de transmisión térmica**

Desde un punto próximo al edificio se tiende una acometida a la red. Todos los edificios se conectan a la red en paralelo, disponiendo de las mismas condiciones de suministro.

En cada edificio se ubica una subestación de transmisión térmica, formada por un sistema de intercambio de calor, sin intercambio de fluido ni de presión, mediante el cual se cede calor a los elementos terminales para el servicio de calefacción y agua caliente sanitaria.

Las subestaciones permiten el acoplamiento del calor de la red con otras fuentes de calor, como puede ser la instalación de energía solar térmica del edificio.

La instalación está provista de sistemas individuales de control y medida del consumo, lo cual ofrece tres importantes ventajas.

1.- Regulación automática. Al funcionar de un modo automatizado, son los consumos de los usuarios los que, mediante la alteración de las condiciones de la red, regulan el funcionamiento de la central térmica. El regulador mantiene constante la temperatura en la red.

2.- Control individual. Instalando un programador termostático convencional cada usuario puede establecer las condiciones de confort en su hogar.

3.- Facturación individual. Al disponer de las mediciones de consumos individuales de energía, el sistema permite la facturación individual a los usuarios, facilitando la gestión de la instalación.

1.2. Tipologías

La forma de la red de calor viene determinada, principalmente, por los condicionantes constructivos (trazado de las calles, situación espacial de las casas que conectar, etc.), por el tamaño de la red y por la existencia de más de una central de generación de calor. De esta manera, existen tres tipologías (figura 4) de redes de calor (CIMBRA, 2019):

- **Redes radiales.** Son las utilizadas en las redes de calor de menor tamaño. Los recorridos cortos de las tuberías y los pequeños diámetros se traducen en costes de construcción bajos y con pocas pérdidas de calor. Las ampliaciones solo son posibles a pequeña escala, debido a la reducida capacidad de la red.

Entre sus ventajas, se trata de un proyecto de red simple y es una tipología que siempre se puede llevar a cabo. Entre las desventajas, las ampliaciones posteriores solo son posibles a pequeña escala.

- **Redes en anillo.** Para actuaciones de mayor tamaño, con una o más centrales de calor, se presta a menudo la tipología de red en anillo. Gracias a ella, se pueden integrar varias centrales de generación de calor y se garantiza una mayor seguridad de suministro, porque frente a la rotura de alguna de las tuberías se puede continuar con el suministro a los diferentes consumidores.

La longitud de la tubería utilizada es mayor que en la red radial, de manera que los costes de inversión y pérdidas de calor son mayores. Estos sobrecostes se pueden minorar gracias al efecto del factor de simultaneidad.

Entre las ventajas, la integración de varias Centrales de Generación de Calor y la mayor seguridad de suministro. No obstante, esto, este tipo solo es posible cuando la topología de la red es apropiada.

- **Redes malladas.** Proporcionan una seguridad de suministro óptima y mayores posibilidades de ampliación. Es la topología con un mayor coste de inversión y utilizada principalmente en las redes de calor municipales. Sus ventajas son la seguridad de suministro, la integración de varias Centrales de Generación de Calor y su opción de ser ampliable.

En el extremo contrario, el de las desventajas, es que presenta elevados costes, principalmente para redes de calor grandes.

1.3. District Heating con Biomasa

La biomasa es la materia orgánica utilizable como fuente de energía, y abarca productos tan variados como madera prensada, astillas, huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, residuos forestales, biocarburantes, etc. El carbono de la biomasa ha sido captado por las plantas durante su crecimiento procedente de la atmósfera.

Por este motivo, la combustión de biomasa supone un balance neutro de CO₂, a diferencia de los combustibles fósiles como el gas o el gasoil, que alteran el equilibrio en la atmósfera y contribuyen al cambio climático.

Las redes District Heating son idóneas para el uso de biomasa. Las calderas de biomasa tienen rendimientos de hasta el 95%, trabajan en un amplio rango de potencias y cuentan con sistemas de alimentación continua y automatizada de combustible, limpieza automática y compactación de las cenizas.

La biomasa es autóctona, es decir, emplea recursos procedentes del entorno en el cual se consume. Como se ha demostrado en países de centro Europa como Alemania o Austria, el uso de la biomasa provoca sinergias sociales relacionadas con la creación de nuevas actividades económicas en el entorno y la mejora de rentas. Además de los beneficios para el medio ambiente y la sociedad, el uso de biomasa presenta interesantes beneficios para el promotor y los usuarios:

- Evita la ejecución de la red de gas hasta la central térmica.
- Permite acceder a cuantiosas subvenciones a fondo perdido dentro del Plan de Energías Renovables (PER).
- No está afectada por variaciones de precios debidas a la escena internacional.
- Permite incorporar cogeneración, con la consiguiente mejora de la eficiencia energética global.

1.4. Ejemplos de Redes de Calefacción Centralizada en Europa

Las redes de calefacción o district heating es una tecnología madura con casi 100 años de antigüedad. En Europa hay instalados más de 70.000 Km de tuberías en redes de calefacción. Estos sistemas varían mucho de unos lugares a otros, tanto en el tamaño de las redes como en los combustibles utilizados. Así, encontramos redes desde 4,5 km en Arbestahal (Austria) hasta 335 km en París, donde abastece a un millón de habitantes. En cuanto a los recursos energéticos empleados varían desde la energía geotérmica en Ferrara (Italia) hasta la incineración de residuos sólidos urbanos en París, pasando por el uso de residuos forestales en la isla de Córcega. A continuación, se describen algunos ejemplos.

- Odense, Dinamarca

En Dinamarca más del 65% de los ciudadanos cubre sus necesidades de calor mediante redes District Heating (figura 5). La primera red de calefacción en Odense se estableció en 1920, habiendo evolucionado hasta la actualidad, en la que presenta una longitud de conducciones de 1.500 Km, con más de 50.000 puntos de consumo y cubriendo el 95% de las necesidades de la ciudad.

- Berlín, Alemania

La región Oriental de Berlín dispone de una red de calefacción que comenzó a instalarse en 1960 y actualmente dispone de más de 529 km de conducciones.

- **París, Francia**

París posee la red más extensa de Europa para el suministro de calefacción mediante vapor a una temperatura de 280°C. La red tiene una longitud de tuberías de 335Km, dando servicio a más de un millón de habitantes y aprovechando la energía procedente de la incineración de Residuos Sólidos Urbanos.

- **Arbesthal, Austria**

La planta de Arbesthal da servicio a 108 viviendas en el centro de la localidad, con una red de 4,5 km de longitud. Los combustibles utilizados son residuos procedentes del cultivo y proceso del girasol.

- **Corte, Isla de Córcega, Francia**

La central de calefacción de Corte se alimenta de residuos forestales y ofrece servicio a 14 edificios públicos.

- **Ferrara, Italia**

La localidad Toscana cuenta con un sistema de calefacción alimentado por fuentes geotermales que suministra a 12.000 usuarios a través de una red de 12 Km de longitud.

- **España**

A pesar de ser el sistema de calefacción más extendido y preferido en el norte y centro de Europa, donde hay ejemplos como Dinamarca en el que más del 65% de la población cubre sus necesidades térmicas a través de una red de calefacción, en España el índice de penetración de las redes es todavía de menos del 1%, 9 puntos por debajo de la media europea.

La tendencia en España destaca en municipios pequeños (REM, 2020). En la actualidad y según el último censo de redes de calor y frío de 2019, España cuenta con 414 redes con más de 1500 MW y más de 740 Kms de redes que suministran calefacción refrigeración y ACS a 5.340 edificios, que permiten ahorros de 303.000Tn de CO₂ al año y un ahorro del 78% en combustibles. Por regiones destacan Cataluña, Madrid, Navarra y Castilla y León (representan el 70% de la potencia instalada). La potencia instalada tiene como fin mayoritario el suministro de calor (75%).

Teniendo en cuenta el cliente final, 7 de cada 10 son terciarios, pero en términos de potencia, el mayor peso es el industrial. Más de la mitad de las redes son de titularidad pública y en potencia instalada existe una distribución equilibrada entre los tres modelos; tres cuartas partes usan biomasa como combustible y el 80% de las redes incluyen energías renovables (Interempresas, 2020)

2. Estudio de caso. Red de calefacción centralizada alimentada con biomasa en Cuéllar (Segovia), España.

Dentro de España, Castilla y León muestra un importante potencial de biomasa. Adicionalmente, existen numerosas empresas que cubren diversas fases de comercialización de biomasa o de equipos específicos de aprovechamiento energético en esta Región.

De acuerdo con los estudios sobre potencial de biomasa desarrollados por IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético) en los años noventa, el municipio de Cuéllar, con 9.200 habitantes, era uno de los lugares adecuados para iniciar la promoción de redes de calefacción centralizada con biomasa. Este municipio, situado al norte de la provincia de Segovia en el límite con la provincia de Valladolid, está rodeado de una importante masa forestal (el 50% del mismo está rodeado de pino negral) (IDAE, 2007). Cuéllar ha estado ligada al pinar, fundamentalmente a través de las industrias de la resina y la madera, que complementaban en su día a la agricultura y a la ganadería como actividades productivas de la población.

Tabla 1. Identificación (Fuente: IDAE, 2007).

Ubicación:	Cuéllar (Segovia)
Entidades involucradas	Ayuntamiento de Cuéllar, Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN) e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)
Año de instalación	1999
Materia prima:	Residuos forestales, residuos de industrias forestales y otras fuentes de biomasa de la zona
Potencia:	Dos calderas, 4.500.000 kcal/h (caldera de invierno) y 600.000 kcal/h (caldera de verano para ACS)

Al margen de la propiedad privada del monte, el número de hectáreas de pinar de la comunidad era superior a las 12.000 ha y calificadas como monte de utilidad pública y, por tanto, de gestión autonómica. Otro potencial susceptible de aprovechamiento en el municipio son los residuos de los cerca de 20 talleres y fábricas del sector de transformación de la madera.

Por ello, el IDAE junto con el EREN (Ente Regional de la Energía de Castilla y León), propusieron al Ayuntamiento de Cuéllar la realización de una red de calefacción centralizada en un barrio del municipio (Tabla1), construido en los años 70, con bloques de viviendas, un centro escolar, un polideportivo cubierto y un centro cultural. Todos los edificios tenían calefacción de gasóleo C y pérdidas energéticas por

aislamientos inadecuados. La red de calefacción municipal se diseñó para dar suministro a la parte del distrito Sur de Cuéllar. La Planta térmica se ubicó a escasos 2.000 metros del punto de consumo más lejano, y con una ubicación estratégica en relación a la incorporación de nuevas áreas residenciales previstas en el planeamiento de ese momento.

La Central de Biomasa de Cuéllar ha sido un proyecto innovador en España, pues, aunque ya existían otras redes de calor por combustión de madera, en ningún caso eran de carácter institucional ni abastecían a un número tan elevado de ciudadanos, ya que se limitaban a producir energía eléctrica o calorífica para fines privados en empresas.

2.1. Descripción del proyecto

La red de calor por biomasa de Cuéllar fue puesta en funcionamiento el 28 de febrero de 1999, constituyendo la primera red de calor que funciona con biomasa forestal en España. Esta red de calor con biomasa se encuentra ubicada en la zona sur del municipio y atiende las necesidades de energía térmica de cinco instalaciones municipales, entre las que están el pabellón polideportivo, con capacidad 1.500 personas; el frontón; centro cultural, que cuenta con 12 salas; piscina climatizada y el colegio público Santa Clara, con 600 alumnos matriculados. Por otro lado, atiende la demanda energética de los vestuarios del campo de fútbol, 6 comunidades de propietarios con 228 viviendas y 24 viviendas unifamiliares (Cantalejo, O. 2001) .

El proyecto de calefacción y agua caliente centralizada de Cuéllar, permite usar los residuos procedentes de la limpieza del monte, así como otros tipos de biomasa, como combustibles para una central térmica en la que se calentará agua para posteriormente distribuirla a los usuarios a través de un sistema de doble tubería preaislada. Los sistemas de calefacción centralizada suministran energía directamente al usuario, evitándole la necesidad de supervisar instalaciones, así como de manipular y almacenar combustibles.

En España, la realización de redes de calefacción hasta el caso de Cuéllar, constituye una actuación altamente novedosa. La energía media anual suministrada por la red de calor de Cuéllar es de 5.500.000 kilovatios hora útiles, para lo cual se emplean anualmente 2.500 toneladas de biomasa forestal, que sustituyen a la combustión de 535.000 litros de gasóleo cada año, logrando una disminución de 1.580 toneladas de dióxido de carbono al año.

Un elemento innovador muy relevante del proyecto desarrollado en Cuéllar es precisamente la alimentación de la central térmica con biomasa. El uso de esta fuente energética renovable y autóctona supone ventajas de todo tipo, fundamentalmente medioambientales, al disminuir la utilización de combustibles fósiles más contaminantes, y de índole social, ya que el aprovisionamiento de biomasa para abastecer la planta redundará en la creación de nuevas actividades económicas en el entorno

(Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Castilla y León, 2019) (IDAE, 1999). Adicionalmente una ventaja interesante para los usuarios de los sistemas de calefacción centralizada es su menor coste frente a los sistemas convencionales, que en el caso de Cuéllar se cifra en una reducción del 10% sobre el recibo antiguo de calefacción.

Obtención de la biomasa

El Ayuntamiento de Cuéllar gestiona el suministro de biomasa que sirve de combustible en la planta. El equipo permite utilizar una amplia variedad de combustibles y entre ellos, residuos de intervenciones silvícolas en el monte, cortezas, envases de madera, cáscaras de piña, etc.

Sistemas principales de la instalación

La instalación dispone de una central de generación con biomasa con una potencia total instalada de 5,9 megavatios que consta de los siguientes elementos principales:

Central de calefacción

La central de calefacción incluye los siguientes elementos:

- Silo de almacenamiento de 100 m³ de capacidad y sistema de alimentación de combustible.
- Caldera principal acuotubular para producción de agua caliente, de 4.500.000 kcal/h, con cámara de combustión de parrilla móvil y multiciclón depurador de humos con recuperador de calor. Uso: capaz de suministrar agua caliente para calefacción y ACS en invierno.
- Caldera auxiliar acuotubular para producción de agua caliente, de 600.000 kcal/h. con cámara de combustión de parrilla móvil y multiciclón depurador de humos con recuperador de calor. Uso: suministrar agua caliente para ACS en verano. El agua caliente se impulsa y distribuye a los usuarios mediante bombas a través de una doble tubería preaislada de 3 km de longitud, accediendo el calor al circuito interno de cada vivienda a través de un intercambiador de placas, retornando como agua fría a la central térmica para iniciar nuevamente el ciclo. Las condiciones de aislamiento de la tubería aseguran unas pérdidas máximas de 1 °C cuando la temperatura exterior es de -5 °C.
- Grupos de motobombas para la circulación del agua caliente en las calderas y en el circuito.
- Transformador eléctrico, depósito de expansión, sistema de control y demás elementos auxiliares.

Red de distribución

Desde la central de generación parte una red de distribución bitubular de 2 kilómetros de longitud con tuberías, mediante la cual se envía el agua caliente a los diferentes usuarios con la ayuda de un sistema de bombeo eléctrico.

La red es de tubería preaislada de acero al carbono con aislamiento de poliuretano y protección mecánica exterior de polietileno de alta densidad. La tubería discurre enterrada en zanja, a aproximadamente 1 metro de profundidad e incorpora los elementos de dilatación, corte, etc. necesarios.

Conexión con los usuarios

En cada centro de consumo se dispone de uno o dos intercambiadores en paralelo con los actuales sistemas de generación y según los casos de un acumulador de agua caliente sanitaria. Adicionalmente se incorporan válvulas de corte, regulación, elementos de control, interconexiones y demás elementos necesarios.

Proceso energético

La biomasa llega a la planta en camiones, que la depositan en el silo de 100 m³ de capacidad. Del silo cae el combustible a unas cintas por la acción de los empujadores hidráulicos que se sitúan en la base de aquél. Esas cintas son las que conducen el combustible hasta las tolvas de alimentación de la caldera. En la caldera se calienta el agua que circula por los serpentines enseriados. Esta agua sale de la central a una temperatura de 95°C, siendo impulsada por la bomba a lo largo de la red de distribución que recorre los puntos de consumo y cuya longitud es de 2 km.

Tabla 2. Datos técnicos (Fuente: IDAE, 1999, 2007).

Tipo de combustible: residuo forestal y biomasa (cortezas, cáscaras de piña y otros).

Calderas:

- Potencia térmica: 4.500.000 kcal/h. y 600.000 kcal/h.
- Fluido térmico: agua.
- Temperatura máxima de salida de fluido: 95°C.

Equipos auxiliares destacables:

- Silo de almacenamiento de biomasa de 100 m³ de capacidad (dos días de funcionamiento aproximadamente).
- Multiciclón depurador de humos, con recuperador de calor.
- Bombas impulsoras de agua a la red.

Red de calefacción y conexiones

- Red de tuberías preaisladas de poliuretano de alta densidad.
- Intercambiadores y conexiones en los centros de consumo.

Aplicación térmica:

- Servicio de calefacción y A.C.S.
-

En los meses de invierno en que se presta el servicio de calefacción y agua caliente, opera la caldera principal, mientras que, en verano, durante el cual sólo es necesario proporcionar agua caliente a los usuarios opera la caldera auxiliar y la red trabaja a un caudal inferior. En los puntos de consumo el agua cede a través del intercambia-

dor de calor la energía necesaria para proporcionar al circuito secundario del consumidor el abastecimiento de calefacción y, en su caso, de agua caliente sanitaria. Una vez cedido ese calor, y ya con una temperatura inferior, el agua retorna a la planta a través de la tubería de retorno, que discurre paralela a la de ida.

Inversión y financiación

La inversión total del proyecto fue de 1,3 millones de euros, de los cuales el 50 % fue aportado a partes iguales por el EREN y el IDAE, que a tal efecto suscribieron un Contrato de Cuentas en Participación y el resto por el Ayuntamiento de Cuéllar a través de un contrato de Financiación por Terceros en 20 años. Además, el proyecto contó con una subvención del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) y otra subvención de la Junta de Castilla y León (170.217 euros y 137.163 euros).

Tabla 3. Datos económicos (Fuente: IDAE, 1999, 2007).

Equipo financiado:

- Central Térmica, red de distribución y conexiones a los centros de consumo, incluido montaje, obra civil, etc.

Inversión (50% IDAE, 50% EREN):

- 190 millones de pta (1.158.000 euros).

Período de presencia del IDAE:

- Estimado en 20 años.

Al término de la presencia de IDAE en el proyecto las instalaciones pasarán a ser propiedad exclusiva del Ayuntamiento de Cuéllar.

Mejoras en la red de calor

En 2013, el Ayuntamiento de Cuéllar realizó una encomienda a la Sociedad Pública de Infraestructuras y Medio Ambiente de Castilla y León para implantación de mejoras en la red de calor y para gestionar la operación del sistema por un periodo de 10 años. La mejora supuso una inversión de 270.000 euros.

Las actuaciones que se acometieron, gracias al compromiso de inversión que ha ejecutado la sociedad, fueron las siguientes: dotación de variadores de frecuencia a los motores de bombas y ventiladores de la central para reducir consumos eléctricos; establecimiento de un sistema de telecontrol programable; mejor gestión de la combustión; reparación de varios elementos de la central con hormigón refractario e instalación de contadores individuales de energía en los edificios municipales y en cada una de las viviendas conectadas al sistema, para desglosar consumos y repartir costes entre los usuarios. Estos cambios tecnológicos en la planta permiten su optimización, eliminando las antiguas ineficiencias, actualizando las conexiones y verificando el cumplimiento de las exigencias en eficiencia energética establecidas por la normativa de aplicación, garantizando su funcionamiento en los próximos años. En 2015, esta red de calor fue incluida dentro de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad denominado "GIRTER" para el desarrollo de una herramienta de gestión energética inteligente y de ayuda a la

explotación de redes de calor y frío, dirigido por Somacyl y la Universidad de Valladolid.

3. Conclusiones del estudio

Según lo expuesto anteriormente, las claves del éxito en la red de calor de biomasa de Cuellar se basan principalmente en:

- La elección de una ubicación óptima que garantiza el suministro de la biomasa.
- El empleo de una tecnología convencional que no implica unos costes elevados.
- Fundamentalmente en la cooperación por parte de todas instituciones públicas (Estatad (IDAE), Regional (Junta de Castilla-León) y local (Ayuntamiento).

El estudio de la operación de la planta de Cuéllar, ha permitido caracterizar los parámetros de funcionamiento más adecuados, habiéndose obtenido un rendimiento térmico total de la instalación del 60%, quedando justificada su viabilidad técnica y económica respecto a otros combustibles tradicionales. El funcionamiento la instalación a lo largo de estos años ha demostrado de manera significativa que se genera energía suficiente para todos los usuarios conectados, eliminándose además los gastos de mantenimiento e incrementándose la comodidad en el servicio, que precisa sólo de la manipulación de un termostato (IDAE, 2007).

Por otro lado, el uso de biomasa forestal, fuente energética renovable y autóctona no sólo supone ventajas de carácter medioambiental, al disminuir la utilización de combustibles fósiles más contaminantes, sino también de carácter Social, ya que el aprovisionamiento de biomasa para abastecer la planta redunda en la creación de nuevas actividades económicas en el entorno. La biomasa empleada durante el primer año de la planta fue corteza de pino y cáscara de piña, ambos residuos excedentarios en la comarca que permitirían la ampliación de la instalación.

Su gran contribución medioambiental a la producción de energía, además de las ventajas sociales como la creación de puestos de trabajo y desarrollo de actividades alternativas en zonas agrícolas y forestales, hacen que esta instalación sirva de modelo para su desarrollo en otras poblaciones con potencial de biomasa. A la pionera red de Cuéllar, se han unido instalaciones repartidas por once comunidades autónomas de la Península. Solo Murcia, La Rioja, Andalucía y la Comunidad Valenciana no cuentan con ninguna red registrada. Cataluña tiene el mayor número de instalaciones (16), seguido de Castilla y León (6) y Navarra (6). Por provincias, ocupa el primer lugar destacado Barcelona, con once redes, entre las que destacan algunas de las más grandes, como la de Sant Pere de Torelló (6 MW) y la de Mataró (4,7 MW). La gran mayoría corresponden a redes públicas.

4. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

Instalación de Redes de Calor en municipios rurales.

Uno de los grandes problemas que existen en la actualidad en España es la *despoblación de las zonas rurales*. De los 8.124 municipios existentes, 4.979 tienen menos de 1.000 empadronados y de ellos 3.972 subsisten con menos de 500. La mayor parte del territorio está afectado por la despoblación con mayor o menor severidad.

Una de las consecuencias de la despoblación es el *abandono de las zonas de cultivo*, con lo que la *superficie forestal*, al contrario de la creencia generalizada, está *aumentando* en las últimas décadas en España. Pero se trata de un crecimiento desordenado y con una nula gestión de los bosques, cuyo resultado es la creación de superficies boscosas con una gran espesura que constituyen auténticos polvorines.

Si además nos encontramos en un contexto de *cambio climático*, en el que debemos buscar alternativas a los combustibles fósiles, la *biomasa se convierte en una excelente alternativa*. Se trata de una fuente de energía de origen renovable, se puede regenerar de forma natural. Además, la biomasa es un combustible prácticamente neutro en cuanto a emisiones de CO₂ puesto que las emisiones que emanan con su quema son reabsorbidas de nuevo, mediante la fotosíntesis de plantas y árboles. En el tema económico, la utilización de una red de calor siempre representa un ahorro de energía y, por tanto, para la economía de los usuarios. En redes de calor alimentadas con astilla de pino (biomasa), el ahorro se encuentra entre el 50-60%.

Por tanto, la instalación de redes de calor alimentadas con biomasa en zonas rurales supone una decisión interesante por las siguientes ventajas principalmente:

- Previene la despoblación, al dotar al municipio de un servicio que mejora las condiciones de vida de los vecinos y crea puestos de trabajo (construcción red de calor, limpieza de monte, producción de astilla, mantenimiento de la red,), asentando la población.
- Se mantienen las zonas boscosas. La explotación de la biomasa, con un adecuado plan de gestión forestal, mantiene el bosque "limpio" y evita, en gran medida, la propagación de grandes incendios forestales.
- Se trata de una energía renovable, con lo que se evita la utilización de combustibles fósiles.
- Reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Se ayuda a la reversión del cambio climático.
- Supone un ahorro económico importante para los vecinos del municipio.

Además, aporta otras muchas ventajas sociales y de cara al usuario, como:

- Disminución de ruidos, vibraciones, olores, molestias en general de los usuarios conectados al sistema.
- Aumento de seguridad. No hay riesgo de explosiones, ni de gases.
- Al eliminar las calderas individuales se gana espacio en las viviendas.
- Valor añadido para casas rurales, hotel, etc.
- Facilidad en la previsión de la facturación energética.
- Asentar la población, generar puestos de trabajo: mantenimiento, obtención combustible

Desde el punto de vista de la *ingeniería*, este sistema también presenta importantes beneficios ya que:

- Reduce el coste de ejecución de la obra civil, ya que la red de agua caliente sustituye a la red de gas y aprovecha las zanjas de la red de abastecimiento de agua.
- Reduce el coste de ejecución de las instalaciones, ya que aprovecha la economía de escala de una central térmica frente a varias salas de calderas o multitud de calderas individuales.

Los District Heating o incluso los District Heating & Cooling están siendo apoyados por las distintas administraciones, tanto desde la Comunidad Europea como a nivel regional y en muchos casos municipal, por ser una solución más eficiente energéticamente que cualquier otra solución de producción de energía térmica que permite, además, la incorporación de fuentes de energía renovables a gran escala.

Otros aspectos a tener en cuenta en los proyectos *District Heating*.

Además de los factores de éxito principales expuestos anteriormente, desde un punto de vista de la ingeniería, es muy importante disponer de unos buenos datos de partida. En este sentido, son aspectos fundamentales a tener en cuenta en el uso de la District Heating o redes de calor en las zonas rurales su dimensionado, diseño e implantación. El proyecto y dimensionado de la red de calor es la base para que sea técnicamente realizable y viable económicamente. Para ello, se deben seguir necesariamente los siguientes pasos:

- Determinación de los usuarios que se conectarán o el cálculo de la **demanda** de calor. Se debe confeccionar un trazado aproximado, basado en consultas a los posibles usuarios, para estimar la rentabilidad.
- **Elección del sistema de generación de calor y de acumulación de inercia.** Este es un punto que hay que decidir en las primeras fases del proyecto de una red de calor. Normalmente, se realiza la generación de calor de forma centralizada y se distribuye desde la central a través de la red a los diferentes usuarios. No obstante, también es posible la generación de calor en diferentes puntos de la red. Otro punto importante es la gestión de la acumulación de inercia. La demanda térmica de la red de calor no solo es estacional, también sufre grandes fluctuaciones a lo largo del día. Por ello, es más que recomendable la instalación de depósitos de inercia que permitan desacoplar temporalmente la generación de calor y la demanda térmica.
- **Diseño del trazado y ubicación central de la generación de calor.** Al mismo tiempo que se realizan los pasos anteriores, hay que fijar un trazado de la red. Esto es necesario para poder calcular la simultaneidad de los diferentes trazados. Hay que tener en cuenta la distribución de los viales existentes, la existencia de otros servicios instalados, la ubicación de los principales consumidores, etc. La ubicación de la central de generación de calor es tema de vital importancia en el diseño de una red. Por razones de eficiencia, es importante instalarla lo más próxima a los usuarios que abastecer, pero por razones de logística (descarga de combustible en los silos) es necesario encontrar una zona donde los camiones tengan espacio

para maniobrar y descargar rápidamente. Existen casos de redes de calor que han fracasado por la instalación de la central en puntos de muy difícil acceso o donde el llenado de los silos debía realizarse por métodos que encarecían el precio final del combustible (descarga manual, descarga neumática, etc.).

- **Cálculo del factor de simultaneidad.** Las distintas curvas de demanda de potencia de los consumidores individuales producen una dispersión temporal de los picos de potencia. Esto se conoce como simultaneidad y es por este motivo que la potencia total realmente requerida es menor que la suma de las potencias máximas individuales.

- La simultaneidad influye en la generación de calor y en la red de calor en sí. Esto permite dimensionarla de forma más ajustada y eficiente.

- **Cálculo de calderas y depósitos de inercia** (Central de Generación de Calor). La potencia máxima precisada por la red de calor es determinante para el diseño de las calderas y los depósitos de inercia. Generalmente, se instalan varios generadores de calor. Se habla de un reparto modular de potencia cuando, en función de la demanda, se ponen en funcionamiento diversas calderas, que pueden trabajar en regímenes óptimos para cada caso.

- La selección del tipo de caldera o fuente de calor (podría utilizarse el calor sobrante de una planta de cogeneración de biogás próximas) se debe adaptar a los recursos disponibles localmente. Para minimizar aún más los ciclos de arranque y para de las calderas (carga media y carga pico), se utilizan los depósitos de inercia. El dimensionado de los depósitos debe estar adaptado a las calderas, la variación de la demanda térmica y al espacio disponible en la central de generación de calor.

- **Cálculo del caudal volumétrico y de la diferencia de temperaturas requerida.** Una vez conocido el trazado de las tuberías y de las diferentes demandas térmicas, se pueden calcular los caudales volumétricos necesarios para el dimensionamiento de las tuberías de la red de calor.

- Se debe intentar mantener las temperaturas de la red de calor lo más bajas posibles para no tener pérdidas de calor innecesarias.

- **Dimensiones de la tubería de distribución/determinación de la ruta crítica.** Para el dimensionado, se toman los caudales máximos requeridos de los trazados individuales. Se debe realizar un dimensionamiento previo cuyo objetivo es identificar el ramal de tubería más desfavorable y su pérdida de carga en el contexto de la red completa. A continuación, se trata de optimizar dicho ramal de tubería para la pérdida de carga total de la red mediante dimensionamiento adecuado de los diferentes ramales parciales.

- **Diseño del equipo de bombeo.** Una vez tenemos la totalidad de la red proyectada, solo queda diseñar el equipo de bombeo, que vendrá definido por la altura de elevación y el caudal máximo que transportar. Para conseguir una mayor eficiencia, es recomendable utilizar bombas reguladas electrónicamente.

Otros factores importantes a considerar son:

- Evaluación de **aspectos medio ambientales**. El aspecto medioambiental es también básico en el diseño tomando de referencia la normativa que

-
- regula las emisiones. Otro aspecto relevante es la eliminación de partículas con sistemas de filtración y chimeneas.
- El potencial de las **fuentes renovables**.
 - **Instalaciones auxiliares** que se precisan (seguridad, protección contra incendios, etc.).

Referencias

- Cantalejo, O., Antolín G., Díez S., Verdú J. (2001). Calefacción centralizada por biomasa, Cuéllar. Informes de la Construcción, Vol. 53 no 475, 113-58.
- CIMBRA. (Mayo 2019). Redes de calor "district Heating". Artículos técnicos de Energías renovables. Revista del colegio de ingenieros técnicos de obras públicas, 414, 34- 43.
- Comunidad de Madrid. (2006). Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas. Guía práctica.
- Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Castilla y León. (1 de marzo de 2019). La pionera red de calor por biomasa de Cuéllar cumple 20 años. https://comunicacion.jcyl.es/web/jcyl/Comunicacion/es/PlantillaSimpleDetalle/1281372057130/_/1284853759690/. Fecha acceso: 18/02/2021.
- Efidistrict. Experiencias similares en España y en Europa. <https://www.efidistrict.eu/nueva-red-calor/experiencias-similares/> Fecha acceso: 04/06/2021.
- Energías Alternativas – Ayuntamiento de Cuéllar. <https://www.aytocuellar.es/medio-ambiente/energias-alternativas/>. 04/06/2021.
- Renewable Energy Magazine (Mayo, 2020) Biomasa <https://www.energias-renovables.com/biomasa>. 04/06/2021.
- ESEN. Redes de Calor Centralizadas (District Heating). www.esengrupo.com. 04/06/2021.
- IDAE. (MAYO, 1999). Documentos IDAE de Diversificación y Ahorro de la Energía. Red de calefacción centralizada alimentada con biomasa en Cuéllar (Segovia).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. (enero de 2007). Energía de la biomasa. Manuales de Energías renovables.
- Interempresas. Los Sistemas de District Heating & Cooling, una solución eficiente de presente y de futuro - Arquitectura y Construcción. Sept 2020. <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/313573-Jornada-tecnica-sobre-Sistemas-de-District-Heating-Cooling.html>. 04/06/2021.
- Naturgy. (Noviembre 2016). Calefacción Urbana (District heating). https://www.naturgy.es/empresas/blog/tecnologias_eficientes/calefaccion_urbana_a_district_heating. Fecha acceso: 04/06/2021.
- Plan de Energías Renovables 2011- 2020. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/plan-de-energias-renovables-2011-2020>. Fecha acceso: 04/06/2021.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso XVIII, 2021: 371-389
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO XVIII. Sistemas de biogás a pequeña escala para las zonas rurales. Caso de estudio en Ecuador

Karel Diéguez-Santana^{1*}, Edwin Collahuaso¹, Amaury Pérez¹

1 Departamento Ciencias de la Vida, Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Pastaza, 160150, Ecuador

Resumen. La digestión anaeróbica (DA) puede valorizar los residuos orgánicos, transformarlos en biogás que puede utilizarse para la iluminación o cocción en los hogares. Además, el digestato posee considerables cargas orgánicas y puede ser empleado para capturar nutrientes que vuelvan a estar disponibles para la fertilización de los cultivos. Este documento investiga el funcionamiento de un sistema de biogás a pequeña escala para su desarrollo potencial en las zonas rurales de la Amazonia Ecuatoriana. El caso de estudio fue el biodigestor piloto continuo de 11m³, que procesa las excretas y aguas residuales del lavado de corrales del programa de producción porcino del Centro de Investigación y Posgrado para la Conservación Amazónica (CIPCA- UEA). Se cuantificaron entradas y salidas, características físicas, químicas y microbiológicas y la tasa de producción de biogás. Las cantidades de biogás promedio diarias registradas fueron de 0.75m³, con un rendimiento de 78 L de biogás/ kg de estiércol. Se evaluó la eficiencia del tratamiento y el potencial de los nutrientes para su uso en programas agrícolas, de manera tal que este enfoque pueda ser aplicado a los agricultores/productores de la zona. Esta experiencia identificó prácticas que pueden ser efectivas para optimizar el funcionamiento del biodigestor y los sistemas agrícolas a pequeña escala en las condiciones rurales de la región Amazónica Ecuatoriana. El análisis incluyó como pueden desarrollarse pequeños sistemas de biogás en la región para aprovechar residuos como materia prima y una breve discusión de las lecciones e implicaciones prácticas de este estudio de caso.

*Correspondencia: Karel Diéguez-Santana E-mail: karel.dieguez.santana@gmail.com

1. Introducción

1.1. Contexto

Actualmente, una cuarta parte de la población mundial (1.600 millones de personas en el mundo), no tienen acceso a la electricidad, la mayoría en las zonas rurales. Además, en todo el mundo, aproximadamente 2.400 millones de personas siguen dependiendo de la biomasa tradicional, como la leña, los residuos agrícolas y el estiércol seco para sus necesidades de cocción y calefacción (Ioannou-Ttofa et al., 2021), lo que es responsable de graves impactos en el medio ambiente y en la salud de las personas, al tiempo que limita las oportunidades económicas para superar la pobreza (Takada y Fracchia, 2007). Las cocinas tradicionales utilizadas en las zonas rurales emiten grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), la combustión incompleta de biomasa también libera emisiones tóxicas y peligrosas, como monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y otros compuestos orgánicos (Ioannou-Ttofa et al., 2021), que son responsables de graves impactos, tanto en el medio ambiente como en la salud humana (Miah et al., 2009).

Al mismo tiempo, existe una necesidad urgente de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), generadas principalmente por la producción y el consumo de energía (IEA, 2020; IPCC, 2007). Por tanto, es necesario implementar tecnologías que puedan contribuir tanto a la reducción de emisiones de GEI como a la erradicación de la pobreza. En ese sentido, los biodigestores domésticos se consideran una tecnología limpia y respetuosa con el medio ambiente que puede ayudar a las comunidades rurales a satisfacer sus necesidades energéticas de iluminación, cocina y electricidad, lo que conduce a mejores condiciones de vida (Bond y Templeton, 2011; Ferrer et al., 2011; Garfí et al., Martí-Herrero et al., 2016)

Esta tecnología es capaz de producir energía (biogás) cuando se utiliza para tratar residuos con elevadas cargas orgánicas (Hadin y Eriksson, 2016) y a la vez estabilizar cargas elevadas de nutrientes y patógenos que puedan provenir de desechos animales (Risberg et al., 2017). El biogás producido por los procesos de DA está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Chasnyk et al., 2015). Además, si se aplica correctamente, puede producir biosólidos (lodos con bajo contenido de patógenos), susceptibles de ser utilizados como fertilizante dado su contenido relativamente alto de macro y micronutrientes. Según la literatura disponible, el desempeño de los diferentes procesos de DA (adheridos o suspendidos), puede verse afectado principalmente por la temperatura y el pH, sin embargo, la salud de las comunidades microbianas y las condiciones de operación juegan un papel central durante la degradación de contaminantes (González et al., 2018; Zhang et al., 2012).

1.2. Propósito u objetivos del capítulo

En el Ecuador la producción porcícola se destina principalmente para consumo interno, contribuye el 2 % del Producto Interno Bruto Agropecuario (Cárdenas et al., 2019), pero trae consigo severos impactos ambientales asociados como la emisión de contaminantes a cursos de agua, suelo y aire (Quishpe-López et al., 2020) que pudieran ser mitigados con el aprovechamiento de los residuos antes de su descarga. Con este fin, los biodigestores domésticos pueden ayudar a gestionar de forma sostenible los residuos de las granjas, producir energía renovable, y de esta forma desempeñar un papel importante como herramienta útil de gestión del estiércol (Hou et al., 2017).

Los diseños de plantas de biogás varían en gran medida, dependiendo del costo, la estructura, la disponibilidad de sustratos y la demanda de energía (Nzila et al., 2012). Existen variados diseños de digestores domésticos, cúpula fija china, tambor flotante indio y el tipo tubular de plástico taiwanés son algunos de los más populares (Pérez et al., 2014).

Además, el digestato, que es el material restante después de la biodigestión anaeróbica, es rico en nitrógeno y otros nutrientes y ha demostrado ser un fertilizante orgánico eficaz. Por tanto, la aplicación de digestato minimiza el uso de fertilizantes inorgánicos. Estos factores colectivamente hacen que la tecnología del biogás sea atractiva y adecuada para que las granjas en áreas rurales implementen un esquema de economía circular, donde la producción de bioenergía puede tener múltiples beneficios (Silva-González et al., 2020; Surendra et al., 2014).

El centro de Investigación, Posgrado y Conservación de la Biodiversidad Amazónica (CIPCA) de la Universidad Estatal Amazónica (UEA), fue creado con el objetivo de desarrollar la investigación y conservación de los recursos naturales de la Amazonia ecuatoriana, a través de la docencia, producción y vinculación con la comunidad. En sus áreas tiene un programa porcino y como centro de experimentación existe un biodigestor anaeróbico para valorizar los estiércoles. Basado en ello, este documento tiene como objetivo investigar el potencial para el desarrollo de tecnología de biogás a pequeña escala utilizando estos desechos que son frecuentes en zonas rurales de la amazonia ecuatoriana.

2. Desarrollo

2.1. Área de estudio

El programa porcino del Centro de Investigación, Posgrado y Conservación de la Biodiversidad Amazónica (CIPCA) de la Universidad Estatal Amazónica (UEA) fue el área de estudio (Figura 1). Localizado a una altura de 523 msnm, en la Provincia de Napo, Cantón Carlos Julio Arosemena Tola, entre los ríos Piatúa y Anzu. Tiene una extensión de 2848,20 hectáreas (ha), con un clima tropical lluvioso corresponde a una formación de selva pluvial amazónica, la precipitación anual alcanza los 4000 mm, la humedad relativa es del 80% y la temperatura varía entre 15 a 25 °C. La

razón para elegir este centro fue que dispone de un biodigestor tubular para el manejo de los estiércoles porcinos.

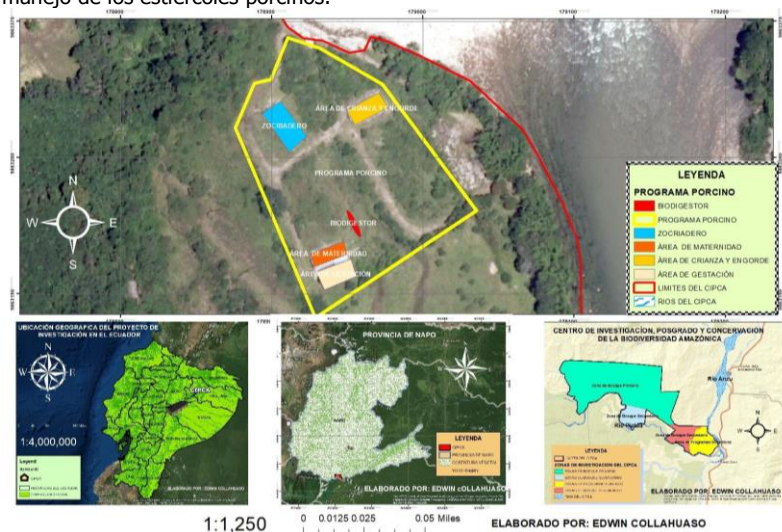


Figura 1. Área de estudio (Fuente: Diéguez-Santana K, 2018, CIPCA, Pastaza, Ecuador).

2.2. Características de la instalación y muestreo

El biodigestor tubular con una capacidad de 11m^3 , fue construido en geomembrana de polietileno por el personal técnico de la organización catalana "Energía sin fronteras". Diariamente se recogió estiércol de cerdos de cría, junto con las aguas residuales del programa porcino CIPCA. El alimento se agitó manualmente durante aproximadamente 3 min antes de agregarlo al biodigestor. El muestreo se realizó en dos puntos diferentes, 1) estanque de acumulación de aguas residuales y estiércol y 2) salida de digestato. Las muestras líquidas y semisólidas (estiércol) fueron recolectadas y homogeneizadas, posteriormente, fueron trasladadas diariamente al laboratorio para determinar los diferentes parámetros. La figura 2 muestra las zonas del muestreo, y la estructura del biodigestor.

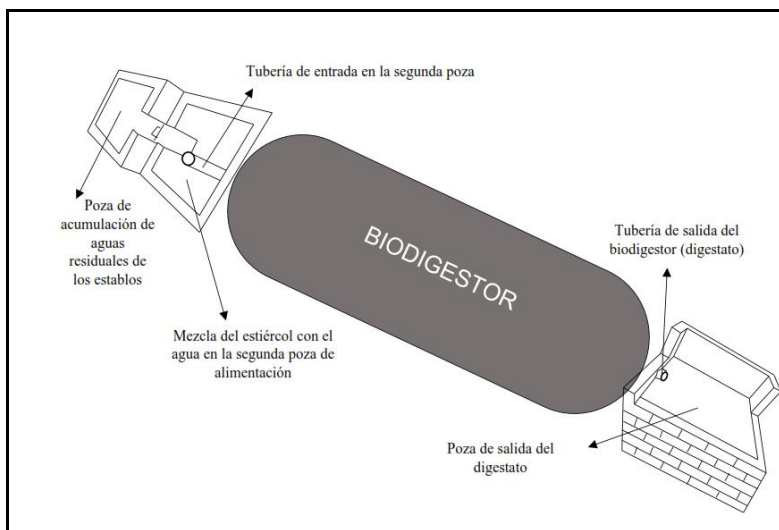


Figura 2. Gráfico del digestor tubular instalado en el CIPCA. (Fuente: Collahuaso E, 2018, CIPCA, Pastaza, Ecuador).

2.3. Monitoreo y evaluación de las entradas/salidas del biodigestor.

Algunos de los parámetros fisicoquímicos se muestrearon diariamente in situ (pH, conductividad, STD, salinidad) con un multi-parámetro portátil PC60 Premium Multi-Parameter Tester, APERA INSTRUMENTS, LLC, calibrado y comprobado en el laboratorio por métodos (APHA, 2012). Mientras que para determinar los parámetros físicos-químicos y microbiológicos se recolectaron muestras homogéneas de las excretas de los corrales y de la salida del biodigestor. Se analizaron en los laboratorios de aguas, suelos y biología de la Universidad Estatal Amazónica. La tabla 1 muestra los principales parámetros evaluados y las técnicas analíticas empleadas.

Tabla 1. Métodos para realizar la caracterización fisicoquímica de la composición de la biomasa biogás y digestato

Elementos a evaluar	Unidad de Medida	Método o técnica analítica.
Sólidos totales (ST)	(%)	Gravimetría Standard Methods No. 2540 B. Total de sólidos secos a 103-105 ° C.
Sólidos volátiles (SV)	(%)	Gravimetría (Standard Methods No. 2540 E. sólidos fijos y volátiles calcinación a 550°C)

pH		Standard Methods Ed. 22, 2012, 4500 H-B. Método electrométrico.
Conductividad eléctrica C.E	(mS/cm)	Conductimetría Standard Methods No. 2520 B. Método Conductividad Eléctrica
Nitrógeno total	(%)-(mg/L)	Standard Methods No. 4500-N. orgánico por Kjeldahl.
Fósforo total- P ₂ O ₅	(%)-(mg/L)	Espectrofotometría UV-Visible. Método de Olsen o Standard Methods Ed-22-2012, 4500 P- B & C. Método colorimétrico del Ácido fosfórico Vanadio Molibdeno.
Potasio Total (K ₂ O)	(%)-(mg/L)	Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama
N- NH ₄ ⁺	(%)-(mg/L)	electro selectivo a amonio
Magnesio total (% MgO) Mg	(%)	Complejometría. O Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama
Calcio total Ca	(%)	Complejometría. O Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica por Llama
DQO	(mg/L)	Standard Methods Ed. 22, 2012, 5220-D. Método Colorimétrico Reflujo Cerrado.
DBO ₅	(mg/L)	PRO TEC 066 / HACH 8043 +0- al 3.72 %.
Coliformes totales	MPN/mL	Standard Methods Ed. 22, 2012, Método 9221B Filtración de Membrana
Escherichia Coli	MPN/mL	Standard Methods Ed. 22, 2012, Método 9221B Filtración de Membrana

Fuente: Modificado de (Rice et al., 2012).

Los equipos empleados para la determinación del nitrógeno total fue un Kjeltec Nitrogen Analyzer. Por su parte, los elementos metálicos (incluyendo K, Mg, Ca) de los desechos porcinos y el biodigestato se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica, modelo Perkin Elmer Analyst 800, basados en técnica de Atomización por llama y principalmente según el método 3111b del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA AWWA WEF, 22^o Edición, 2012.

En el caso de la medición de biogás, se utilizó el registro diario de dos gasómetros marca Humcar G 1.6 Gasmeter, que registraron el biogás en m³ y se encuentran colocados en:

- Gasómetro inicial: salida de biogás del biodigestor, con el objetivo de cuantificar el biogás producido.
- Gasómetro Final: ubicado en la instalación de preparación de alimentos porcinos, a la salida del reservorio de biogás y registra el consumo de biogás en la fuente de cocción (quemadores).

En la Figura 3 se detalla el equipamiento utilizado para el reporte diario de biogás.

GASOMETRO INICIAL



GASOMETRO FINAL



Figura 3. Imagen de gasómetros marca Humcar G 1.6 Gasmeter para registro de generación de biogás. (Fuente: Collahuaso E, 2018, CIPCA, Pastaza, Ecuador).

2.4. Cantidades de residuos alimentados al biodigestor

La instalación del programa porcino tiene 12 cerdos con un peso de 17 a 117 kg en pie entre los de crianza y engorde. La producción diaria de estiércoles del programa porcino varía entre 7 y 18 kg diarios aproximadamente (Ver Figura 4). La cantidad de sustrato generada depende de la cantidad de animales, el tipo de alimentación y de las horas de alimentación. Durante la primera semana los valores máximos fueron de 11 kg, la segunda semana permanece de forma constante con una producción de 10 kg, la tercera se observó un aumento de 12 kg, pero algunos días disminuyó hasta 7 kg, la cuarta semana no presentó cambios y la producción de estiércol fue de 9 a 11 kg. Por su parte, en la quinta semana existe una mayor producción de excrementos entre 10 a 18 kg, aunque, el sexto día de monitoreo, se excluyen por los inhibidores, dado que ese día fueron vacunados los cerdos y no se recolectaron las excretas de la sección precrianza y engorde como también de maternidad y solo se recolectó del área de gestación, con el pasar de los meses los lechones tendían a crecer y la producción promedio diaria llegó hasta los 14 kg. Estas cantidades de excretas se mezclan con aguas de limpieza de los corrales que incluye orinas o purines y otros restos de alimentos o estiércoles que quedan adheridos a la base de los corrales y son arrastrados en las labores de limpieza.

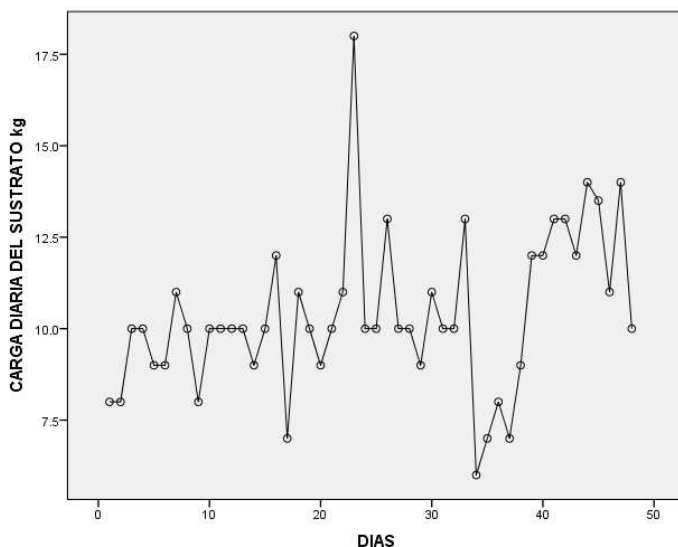


Figura 4. Cantidades diarias de sustrato producido (estiércoles) del programa porcino. (Fuente: Collahuaso E, 2018, CIPCA, Pastaza, Ecuador).

2.5. Cuantificación del biogás y caracterización del influente y afluente del digestor

La cantidad de biogás promedio diaria registrada fue de 0.75m^3 . Mientras que los valores inferiores y superiores fueron de 0.49m^3 y 1.17m^3 respectivamente. En resumen, las cantidades de biogás por kg de estiércol fueron de 78L/kg de estiércol, valores que son superiores a los mencionados por J. Martí-Herrero (2019) para este tipo de biodigestores (valores hasta 71L/kg), pero que pueden estar asociados a que la capacidad instalada es superior a la alimentación y los tiempos de retención hidráulico son superiores a 40 días, lo que implica una mayor cantidad de días en degradación de los residuos. Además, la dieta de los cerdos puede influir en la composición de los sustratos.

La tabla 2 muestra los valores medios de los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados de las entradas y salidas del digestor. Adicionalmente se presentan los valores establecidos por la legislación ambiental con respecto a la descarga de aguas residuales en el Ecuador, norma de calidad ambiente y descarga de efluente: recurso agua, para la descarga a cuerpos de agua dulce y para riego (MAE, 2015).

Los volúmenes promedio del influente fueron de $0.12\text{m}^3/\text{día}$, que se derivan de las aguas que se mezclan con los estiércoles. En cuanto a los valores del pH se mantuvo

en valores neutros y ligeramente básicos. En el caso de la salida si se mantiene más cercano a 7, lo que refleja que cumple con límites de descarga (valores entre 6 y 9). Estos rangos se mantuvieron durante todo el tiempo de monitoreo. Por otro lado el pH afecta el crecimiento de microorganismos, un aumento de pH resultaría en aumento de la toxicidad (Pilarska et al., 2016). El rango de pH ideal para la DA es muy estrecha: pH 6.8–7.2. La tasa de crecimiento de los metanogénos se reduce considerablemente por debajo de pH 6.6 (Medina y Poletth, 2014). Mientras que un pH excesivamente alcalina puede conducir a la desintegración de los gránulos microbianos y su posterior fracaso del proceso (Martí-Herrero et al., 2016). Aunque el pH óptimo de la metanogénesis es alrededor de 7.0, el pH óptimo de la hidrólisis y acidogénesis se informa que esta entre pH de 5.5 y 6.5, lo que en algunos casos conduce a la digestión por etapas, como alternativa para mejorar los procesos de DA.

Tabla 2. Resultados de los parámetros fisicoquímico y microbiológico evaluados de las entradas y salidas del digestor

Parámetros	Influyente carga inicial	Efluente carga final	Descarga a cuerpos de agua dulce	Riego
pH	6.73-8.33	7.2-7.5	6-9	6-9
Conductividad (mS/cm)	2.2-4.6	3.32- 4.15	-	700
Sólidos totales (mg/L)	6047.2	2450	1600	2000
Sólidos fijos (mg/L)	4696	1860	-	
Sólidos volátiles totales (mg/L)	1351.2	590	-	
Fósforo (ppm)	297.4	290	10	
Nitrógeno Kjeldahl (NKT) (mg/L)	3194.06	373.42	15	
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	103.41	201.07	10	50
Potasio (mg/L)	0.0005	0.00055	2	
Magnesio (mg/L)	0.0012	0.00022		
Calcio (ppm)	0.011	0.0012		
DQO (mg/L)	3238	1982	500	
DBO ₅ (mg/L)	1388.4	1082.1	250	
Coliformes totales.	2.2x10 ⁵	2.6x10 ⁵	Remoción al 99%	
E. Coli	1.12x10 ⁵	8.2x10 ⁵		1000 NMP

Fuente: Elaborado por los autores

En el caso de la conductividad en los puntos de muestreo los valores son bajos (inferiores a 10 mS/cm), lo que es importante, puesto que cuando existe una elevada conductividad puede suponer un problema si se aplica en exceso en suelos con baja precipitación, o con suelos regados con aguas con problemas de salinidad (Friedma y McMichael, 1989). En el presente estudio los rangos de conductividad cumplen con las normas para riego, por lo que el digestato puede ser aplicado a los cultivos.

Al analizar otros valores para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce o riego, los resultados no cumplen con la normativa AM-097-A establecido por el Ministerio del Ambiente (MAE, 2015), solamente los valores de magnesio y el pH cumplen con el rango establecido. La DQO de salida fue de 1982 mg/L y no cumple con la normativa para descargas a cuerpo de agua dulce, aunque en comparación con otros resultados de estiércoles tratados, por ejemplo en sistemas de lagunajes es inferior (2930 mg/L) (Blanco et al., 2015). Aunque los parámetros no cumplen con la legislación ambiental, es importante resaltar entre los porcentajes de remoción sobresale el 59.5% de los sólidos totales y el 88.3% del nitrógeno total. También tienen una reducción significativa el magnesio y el calcio, del 61, 7 y 89.2% respectivamente. Mientras que las cargas orgánicas no sufren una disminución significativa, pues la remoción de DQO y DBO₅ solo llega a 38.8 y 22.06%, por lo que quedan cargas sin mineralizar que pueden ser problemas potenciales de contaminación de suelos y cuerpos de agua adyacentes al lugar, donde pueden incrementar el potencial de acidificación y eutrofización (Diéguez-Santana et al., 2020; Soto-Cabrera et al., 2020).

La reducción de la carga del efluente no es suficiente para cumplir con las normas ambientales nacionales de descarga a cauces superficiales de agua dulce. Esto está asociado a que las cargas orgánicas de los estiércoles incorporadas al digestor son elevadas y además las condiciones mesófilas no influyen significativamente en la degradación de los sustratos. Sin embargo, en la aplicación del digestato en cultivos de la región parte de las cargas orgánicas puedan incorporarse paulatinamente al suelo. A pesar de ello, continúa siendo un riesgo la presencia de cargas orgánicas sin mineralizar, por lo que el sistema de digestión anaeróbica actual pudiera mejorarse incrementando el tiempo de retención hidráulico del biodigestor, con la finalidad que se degraden más los compuestos orgánicos recalcitrantes y a la vez esto pudiera incrementar las tasas de producción de biogás. Otra variante pudiera ser realizar mezclas con otros residuos de la región (codigestión de los sustratos) o la incorporación de un proceso de pretratamiento de los sustratos alimentados como la inclusión de un proceso por etapas, donde se pueda colocar un primer digestor para la hidrólisis y un segundo para mejorar el funcionamiento de las comunidades meta-nogénicas.

En cuanto a los valores de los nutrientes, en sentido general son bajos, pero el digestato, puede tener aportes nutricionales para la aplicación a los cultivos, aunque las concentraciones son insuficientes para compararlo con un fertilizante orgánico,

pues según Anexo 8, del Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícolas (MAG, 2018) y la normativa europea, el mínimo para ser declarado para un subtipo fertilizante orgánico de cada nutriente N, P o K debe ser al menos 1% (UE, 2019), y en ninguno de los mismos logra llegar a esa cantidad el digestato final obtenido, pues son valores difíciles de encontrar en digestatos de biodigestores de baja carga.

2.6. Potencialidades de desarrollo de la digestión anaeróbica en la región.

Las provincias amazónicas ecuatorianas tienen un potencial en las zonas rurales en los últimos años actividad agrícola y ahora pecuarias se han incorporado en zonas deforestadas y han suplantado vastas extensiones de terreno. Según Ríos-Núñez and Benítez-Jiménez (2015) en la región el 51,1% del suelo está dedicado a bosques y montes, el 40,9% a pastos (naturales y cultivados) y sólo el 2,6% a cultivos permanentes y transitorios. De estas cifras en la Amazonía por uso agropecuario existen 142 693, 23 692, 340 843 y 97 824 hectáreas de Cultivos permanentes, Cultivos transitorios, pastos Cultivados y Pastos Naturales respectivamente (ESPAC, 2020). La tabla 3 muestra las cantidades de animales por raza y provincias de la región amazónica. Siendo más de 30000 fincas bovinas de lecherías doble propósito o cría-ceba, mientras que existen más de 100 granjas porcinas con 20 o más animales. Por lo que los beneficiarios podrían ser un grupo amplio de la población de la región.

Tabla 3. Animales por raza y provincias de la región amazónica

Provincia	Vacuno	Porcino	Ovino	Asnal	Caballar	Mular	Caprino
Morona Santiago	111 912	6 518	2 275	19	5 434	353	44
Napo	36 463	2 715	63	153	812	393	
Orellana	44 226	5 698	15	58	1 501	536	
Pastaza	21 035	3 291	58	53	1 348	13	6
Sucumbíos	102 468	23 952	301	72	6 282	2 160	244
Zamora Chinchipe	54 087	5 095	88	94	2 943	582	
Total	370 190	47 269	2 799	448	18 321	4 036	294

(Fuente: Adaptado de (ESPAC, 2020).

Adicionalmente, algunos de los principales cultivos y plantaciones aparecen en la tabla 4, que son fuentes potenciales generadoras de residuos agrícolas que pueden ser empleados como sustratos para co-digerir con los estiércoles de animales de la región. Por otra parte, las estadísticas nacionales mencionan que en el medio rural un ciudadano ecuatoriano promedio genera diariamente alrededor de 0.35 kg de

residuos sólidos urbanos (CNC, 2019), y la fracción mayoritaria de los residuos (alrededor de un 70%) corresponde a desechos orgánicos como restos de alimentos (Diéguez-Santana et al., 2021), que pudieran ser sustratos también a incorporar en los biodigestores domésticos.

Tabla 4. Superficie en hectáreas de los siete principales cultivos y plantada con pastos en la Región amazónica

Provincia	Pastos	Yuca	Plátano	Cacao	Café	Caña	Maíz	Palma africana
Morona Santiago	81446	1463	2092	2626	88	258	1281	-
Napo	28781	1049	2598	8522	557	-	3045	-
Orellana	25373	1354	3954	18699	8092	-	4053	12657.3
Pastaza	23908	955	2684	315	184	1243	59	
Sucumbíos	102068	621	5160	27072	13070	1093	5125	21388.3
Zamora Chinchipe	79271	1002	1594	1111	152	1386	87	-
Total	340847	6444	18082	58345	22143	3980	13650	34045.6

(Fuente: Adaptado de ESPAC, 2020).

3. Conclusiones del estudio

Este documento abordó las posibles opciones de desarrollo de tecnología de biogás a pequeña escala utilizando residuos animales y su idoneidad para implementar en las zonas rurales de la Amazonia ecuatoriana así como aspectos como la experiencia del funcionamiento de un biodigestor piloto ubicado en el CIPCA de la Universidad Estatal Amazónica y directrices para incorporar el estiércol producido en diferentes granjas para que pueda ser manejado por tecnología de biogás a pequeña escala.

Los sistemas de biogás a pequeña escala ofrecen no sólo la solución para hacer frente a las cargas negativas de los estiércoles, sino que al mismo tiempo proporcionan beneficios positivos en términos de energía sostenible (biogás) y fertilizante orgánico (digestato). Las cantidades de biogás promedio diarias registradas fueron de 0.75m³, con un rendimiento de 78 L de biogás/ kg de estiércol. Los parámetros fisicoquímicos (ST, SV, pH, Conductividad, N, P, K, Mg, Ca, DQO, DBQ5) del biodigestor tubular, aunque no se encuentran dentro de los valores permisibles para descargas a cuerpos de agua, son inferiores a las cargas de los estiércoles. Para cumplir con ello, en el sistema de digestión anaeróbica actual se pudiera incrementar el tiempo de retención hidráulico del biodigestor, realizar mezclas con otros residuos de la región (codigestión de los sustratos) o incorporar un proceso de pretratamiento de los sustratos (Proceso de dos etapas, un primer digestor para la hidrólisis y un segundo para metanogénesis).

En la región existen variados residuos que pueden ser empleados como co-digestión, por lo que existe un suministro suficiente de materias primas (estiércoles de granjas porcinas y bovinas) por lo que las diferentes pequeñas granjas pueden ser sitios de instalación de tecnologías de biogás.

Restan muchos desafíos por investigar que abarcan desde las implicaciones políticas, las barreras socioeconómicas y la difusión en el medio rural de la Amazonia Ecuatoriana.

4. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas. Desafíos de la implementación de la tecnología de biogás

Las tecnologías de biogás pueden tener grandes retos y dificultades para su implementación. Variados criterios ambientales, económicos y sociales pueden incidir en las tecnologías de digestión anaeróbica en el medio rural ecuatoriano. Es conocido que los beneficios directos e indirectos para los pobladores y para la sociedad pueden ser una de las razones impulsoras del éxito potencial de implementar estos sistemas. Algunos, de los beneficios directos implica la posibilidad de incorporar en los hogares una cocción más saludable, una menor demanda de leña; mayores rendimientos de la producción agrícola por la aplicación de digestato a los campos y mejoras ambientales como disminución de la contaminación.

Según Garfí et al. (2016) entre los aspectos ambientales los biodigestores anaeróbicos pueden controlar la contaminación ambiental al permitir el tratamiento de aguas residuales y desechos orgánicos; reducir el uso de leña para cocción (deforestación) y reducir las emisiones de GEI al evitar que cantidades de residuos orgánicos se degraden anaeróbicamente y produzcan metano sin aprovechar su valor calorífico.

Sin embargo, a pesar de los beneficios de estas tecnologías, todavía hay desafíos importantes que tratar, como el interés del estado en el desarrollo general de la política energética, la difusión de las fuentes de energía renovables, las limitaciones económicas de las comunidades rurales, las dificultades de acceso a créditos o la competencia con combustibles fósiles que son subsidiados. Experiencias en otros países han sugerido la implementación de paquetes de tecnologías de biogás de bajo costo en pequeñas granjas para la cocinas domésticas de hogares rurales (Rosyidi et al., 2014), y así poder manejar adecuadamente los residuos mediante la integración con los sistemas agrícolas. Otros autores Roubík y Mazancová (2020) proponen que la integración del sistema de biogás con unidades agrícolas puede ser esencial para lograr la viabilidad técnica, económica y ambiental.

Los biodigestores en el medio rural pueden proporcionar tanto biogás como digestato que se puede utilizar como fertilizante (Garfí et al., 2016). En el caso del biogás puede reemplazar los combustibles tradicionales (como leña y propano), mientras que las fracciones de digestato pueden ser empleadas como sustituto de los fertilizantes químicos o compost en los cultivos, que generalmente son insumos agrícolas. Algunos reportes en América Latina, mencionan que el empleo del biogás como

combustible para cocción puede ahorrar a familias entre 400 USD al año (Garwood, 2010), en Ecuador esas cifras pueden ser inferiores pues el gas licuado de petróleo (GLP) es subsidiado (se comercializa a 3 USD los cilindros de 15 kg), pero muchas familias rurales en ocasiones no pueden acceder a los mercados de venta por lo que el biogás puede reemplazar la madera u otras fuentes alternativas. Esto implica como menciona Garfí et al. (2016) que las familias de agricultores estén más interesadas en el digestato que en el biogás. El estudio de Garfí et al., (2012) en los Andes peruano muestra que al usar digestato como fertilizante en lugar de compost las familias de los andes peruano pueden ahorrar hasta el 2% del ingreso anual familiar. Según Wrap (2021), las cantidades de digestato por sus valores de Nitrógeno (N), Fosfatos (P_2O_5) y potasio (K_2O) tienen un valor financiero de los nutrientes fácilmente disponibles de 4.12, 0.21, 0.99, para Nitrógeno (N), Fosfatos (P_2O_5) y potasio (K_2O) respectivamente, lo que equivale a 5.32 USD por tonelada de digestato producida.

En cuanto al costo, estos biodigestores tubulares han sido analizados en trabajos anteriores en América Latina (Perú, Bolivia, Ecuador) y según los costos de materiales, mano de obra para la instalación y otros, los costos totales se ubican alrededor de los 1729 dólares para una vida útil de 20 años (Garwood, 2010; Pérez et al., 2014), siendo la tecnología más asequible para las familias de bajos ingresos debido a una menor inversión inicial en comparación con los modelos de cúpula fija y tambor flotante (Garfí et al., 2016).

Estos montos hacen que aún se requiera para la implementación de biodigestores la ayuda o apoyo de programas de subsidios pues muchas de las familias rurales no disponen presupuestos suficientes para acometer la compra de materiales e instalación. Garfí et al. (2012) propuso que para ello se deben reducir los costos del digestor; crear cooperativas locales para la instalación y mantenimiento de los sistemas de biogás; o evaluar el comercio de emisiones de carbono u otro mecanismo de subsidio sostenible. Mientras Garwood (2010) aboga por subvenciones financieras para apoyar la compra y el mantenimiento de los digestores en el medio rural.

Mientras en el contexto social, las tecnologías de digestores anaeróbicos para el medio rural pueden reportar una serie de beneficios sociales y para la salud. La combustión directa de biomasa en interiores de viviendas produce humo y partículas de hollín que aumentan el riesgo de una serie de infecciones respiratorias agudas (Katuwal y Bohara, 2009) por lo que la sustitución de la leña o de otros combustibles sólidos por biogás puede mejorar la calidad del aire interior, la salud y la calidad de vida (Surendra et al., 2014).

Adicionalmente, en el medio rural existen reportes que afirman que se reduce el tiempo de recolección de leña para la cocción que son considerados como costos de oportunidad y limitan el desarrollo socioeconómico (Garfí et al., 2012). La difusión de los beneficios de la tecnología de biogás puede ayudar a que pobladores pierdan los temores y se aseguren si este sistema puede ayudarle en sus actividades cotidianas, otra iniciativa como proporcionar módulos de capacitación completos para

cubrir temas relevantes como los beneficios y la seguridad del biogás, la instalación, operación, mantenimiento, producción y aplicación de fertilizantes fueron sugeridos por (Garwood, 2010). Mientras Martí-Herrero et al. (2015) en un estudio en los Andes bolivianos agrega que las instalaciones deben respetar las estructuras sociales existentes o integrarse con el modo de vida y la agricultura de las familias locales para tener mejor y sostenibilidad en el tiempo.

La tecnología del biogás como fuente de energía requiere para implementación en el medio rural una fuerte difusión. En ese sentido las alianzas entre los gobiernos locales, la academia, la cooperación con ONG y el sector privado pueden ser pasos importantes. Por ejemplo, la integración de la academia-comunidad (interacción/experimentación de estudiantes las carreras ambientales/agropecuarias y agricultores) puede ser un medio de difusión y capacitación. El desarrollo de charlas con estudiantes y habitantes locales, pueden contribuir en investigaciones futuras. La alianza con el medio local a través de actores puede proporcionar una mayor formación y mejorar la integración de la tecnología del biogás en las unidades agrícolas. La figura 5 muestra algunas de las actividades desarrolladas en los predios de la instalación del biodigestor.



Figura 5. Instalaciones del biodigestor tubular del programa porcino Universidad Estatal Amazónica. (Fuente: Diéguez-Santana K, 2018, CIPCA, Pastaza, Ecuador).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Organización Catalana "Ingeniería Sin Fronteras" y el proyecto "Fortalecimiento de la cooperación universitaria/municipal en la implementación de tecnologías apropiadas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos" financiados por la AECID Ecuador. Además, a la Ing. Janeth Sánchez, el Ing. Facundo García y PhD Jaime Martí por la colaboración en el proyecto de investigación.

Referencias

- Blanco, D., Suárez, J., Jiménez, J., González, F., Álvarez, L., Cabeza, E. & Verde, J. (2015). Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 38(4), 441-447.
- Bond, T. & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347-354.
- Cárdenas, E. V., Maldonado, J. M., Valdez, R. A., Sarduy-Pereira, L. B. & Diéguez-Santana, K. (2019). La producción más limpia en el sector porcino. Una experiencia desde la Amazonia Ecuatoriana. *Anales Científicos*, 80(1), 76-91.
- Chasnyk, O., Sołowski, G. & Shkarupa, O. (2015). Historical, technical and economic aspects of biogas development: Case of Poland and Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 227-239.
- CNC. (2019). Informe sobre mapeo de actores generadores de información a nivel territorial e identificación de fuentes de información de la competencia de desechos sólidos (1ra ed.). Retrieved from Quito, Ecuador:
- Diéguez-Santana, K., Casas-Ledón, Y., Loureiro Salabarria, J. A., Pérez-Martínez, A. & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). A life cycle assessment of bread production: A Cuban case study. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 8(2), 125-137.
- Diéguez-Santana, K., Sarduy-Pereira, L. B. & Decker, M. (2021). Characterization and Quantification of Municipal Solid Waste in Fátima, Ecuadorian Amazon Parish *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 9(2), 392-401.
- ESPAC. (2020). Boletín técnico 01-2019-ESPAC. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Retrieved from Quito, Ecuador: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin%20Tecnico%20ESPAC_2019.pdf
- Ferrer, I., Garfí, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderon, A. & Velo, E. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1668-1674.
- Friedma, H. & McMichael, P. (1989). Agriculture and the state system: The rise and decline of national agricultures, 1870 to the present. *Sociologia ruralis*, 29(2), 93-117.
- Garfí, M., Ferrer-Martí, L., Velo, E. & Ferrer, I. (2012). Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 575-581.

-
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A. & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614.
- Garwood, A. (2010). Network for biodigesters in Latin America and the Caribbean: case studies and future recommendations (Technical notes No. IDB-TN-207 2010). Retrieved from <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Network-for-Biodigesters-in-Latin-America-and-the-Caribbean-Case-Studies-and-Future-Recommendations.pdf>
- González, E. C., Pérez-Martínez, A., Herrera-Robledo, M. & Diéguez-Santana, K. (2018). The Pig Manure Anaerobic Digestion. A tubular biodigester characterization in the Ecuadorian Amazon. Paper presented at the MOL2NET 2018, International Conference on Multidisciplinary Sciences,.
- Hadin, A. & Eriksson, O. (2016). Horse manure as feedstock for anaerobic digestion. *Waste Management*, 56(Supplement C), 506-518.
- Hou, J., Zhang, W., Wang, P., Dou, Z., Gao, L. & Styles, D. (2017). Greenhouse Gas Mitigation of Rural Household Biogas Systems in China: A Life Cycle Assessment. *Energies*, 10(2), 239.
- IEA. (2020). CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview. Retrieved from Paris, France: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>
- Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Seifelnasr Moustafa, A., Abdelsalam, E., Samer, M. & Fatta-Kassinos, D. (2021). Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125468.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: synthesis report. Retrieved from Geneva, Switzerland: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- Katuwal, H. & Bohara, A. K. (2009). Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2668-2674.
- MAE. (2015). Acuerdo Ministerial 097-A. Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI. Quito, Ecuador Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- MAG. (2018). Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícolas Retrieved from Quito, Ecuador: <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/Manual-T%C3%A9cnico-para-registro-y-control-fertilizantes-enmiendas-de-suelo-y-productos-afines-de-uso-agr%C3%ADcola-14-12-2018-publicar-web.pdf>
- Martí-Herrero, J. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Quito, Ecuador: Redbiolac.
- Martí-Herrero, J., Ceron, M., Garcia, R., Pracejus, L., Alvarez, R. & Cipriano, X. (2015). The influence of users' behavior on biogas production from low cost tubular digesters: A technical and socio-cultural field analysis. *Energy for Sustainable Development*, 27, 73-83.
-

-
- Martí-Herrero, J., Flores, T., Alvarez, R. & Perez, D. (2016). How to report biogas production when monitoring small-scale digesters in field. *Biomass and Bioenergy*, 84, 31-36.
- Medina, F. & Poleth, V. (2014). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica para un reactor anaerobio horizontal con material de soporte PET, con efluente de la industria láctea. Quito: EPN, 2014.,
- Miah, M. D., Al Rashid, H. & Shin, M. Y. (2009). Wood fuel use in the traditional cooking stoves in the rural floodplain areas of Bangladesh: A socio-environmental perspective. *Biomass and Bioenergy*, 33(1), 70-78.
- Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Tuigong, D., Kiriamiti, H. & van Langenhove, H. (2012). Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy*, 93, 496-506.
- Pérez, I., Garfí, M., Cadena, E. & Ferrer, I. (2014). Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable Energy*, 62, 313-318.
- Pilarska, A. A., Pilarski, K., Witaszek, K., Waliszewska, H., Zborowska, M., Waliszewska, B. & Szwarc-Rzepka, K. (2016). Treatment of dairy waste by anaerobic co-digestion with sewage sludge. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 23(1), 99-115.
- Quishpe-López, J. D., Lliguicota-Guarquila, J. P., Sarduy-Pereira, L. B. & Diéguez-Santana, K. (2020). La producción más limpia, como estrategia de valorización (ecoeficiencia) del centro de faenamiento, Puyo, Pastaza, Ecuador. *Revista Científica de la UCSA*, 7(3), 59-71.
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A. & Lenore, S. (2012). *Standard methods: For the examination water and wastewater*, 22nd edn. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation. Retrieved from
- Ríos-Núñez, S. & Benítez-Jiménez. (2015). Análisis del funcionamiento económico productivo de los sistemas de producción cárnica bovina en la Amazonía Ecuatoriana. *Archivos de zootecnia*, 64(248), 409-416.
- Risberg, K., Cederlund, H., Pell, M., Arthurson, V. & Schnürer, A. (2017). Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Management*, 61, 529-538.
- Rosyidi, S. A. P., Bole-Rentel, T., Lesmana, S. B. & Ikhsan, J. (2014). Lessons Learnt from the Energy Needs Assessment Carried out for the Biogas Program for Rural Development in Yogyakarta, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 20-29.
- Roubík, H. & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. *Environmental Development*, 33, 100505.
- Silva-González, J. A., Chandel, A. K., da Silva, S. S. & Balagurusamy, N. (2020). Biogas in Circular Bio-Economy: Sustainable Practice for Rural Farm Waste Management and Techno-economic Analyses. In N. Balagurusamy & A. K. Chandel (Eds.), *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry* (pp. 389-414). Cham: Springer International Publishing.
-

-
- Soto-Cabrera, A. I., Panimboza-Ojeda, A. P., Ilibay-Granda, C. G., Valverde-Lara, C. R. & Diéguez-Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, 18(1).
- Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G. & Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.
- Takada, M. & Fracchia, S. (2007). A review of energy in national MDG reports. Retrieved from New York, United State: https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable_energy/a_review_of_energyinnationalmdgreports/
- Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo, 25.6.2019 C.F.R. (2019).
- Wrap. (2021). Compost calculator. Retrieved from <https://wrap.org.uk/resources/tool/compost-calculator>
- Zhang, Y., Banks, C. J. & Heaven, S. (2012). Co-digestion of source segregated domestic food waste to improve process stability. *Bioresource Technology*, 114(Supplement C), 168-178.

CASO XIX. Espacios rurales en transición energética. Transformando los residuos en bioenergía

Ada Graciela Nogar ^{1*}

1. *CIC, UNICEN, CESAL, Tandil-Argentina.*

Resumen. Energía y ambiente, dos preocupaciones del s. XXI. La energía como recurso estratégico insustituible, y el ambiente como soporte vulnerable continuo. Los procesos de apropiación impulsados desde el consumo ilimitado de energía fósil aceleran la degradación ambiental, intensifican el cambio climático mientras que políticas energéticas deficientes en territorios marginales, profundizan la crisis e incrementan la población sin acceso a las redes. Considerando el contexto (crisis, transición, inclusión, generación distribuida) este capítulo se propone analizar las barreras y las potencialidades para la generación de biomasa con fines energéticos proveniente de residuos pecuarios a partir de estudios de caso realizados en la Provincia de Buenos Aires para ponderar su aporte a la transición energética en un contexto de crisis energética, colapso ecológico y disrupción tecnológica. El trabajo reúne avances de investigaciones individuales y colectivas, con eje en la generación distribuida, localizada y descentralizada donde se identificaron actores, articulaciones, móviles y barreras asociadas a las experiencias en marcha. Un abordaje metodológico cualitativo y un enfoque integral, permitieron dar cuenta de la manera en que se articulan los actores, recursos y dispositivos (técnicos, económicos, políticos) creando espacios y mecanismos para activar las mutaciones. El análisis desde una perspectiva holística, multidisciplinaria y multiescalar coadyuvó en la obtención de los resultados preliminares que enuncian obstáculos vinculados con las prácticas socio técnicas, el escenario legal, el escenario financiero y el entorno político-territorial, entre otros.

* Correspondencia: Ada Graciela Nogar nogargraciela02@gmail.com

1. Introducción

1.1. Contexto

La energía es imprescindible para las actividades productivas, extractivas y de servicios en crecimiento; mientras que las consecuencias de la combustión, mayoritariamente fósil, se expresa en los gases efecto invernadero, la crisis energética, el aumento de población sin acceso, la puja de poderes que trastocan el orden geopolítico y las transformaciones de los territorios depositarios de lo residual. En diferentes investigaciones y discursos (políticos y técnicos) se aduce que el calentamiento global es el principal desafío ambiental a escala mundial al que las sociedades se enfrentan en la actualidad. El incremento de la temperatura media global se manifiesta en la disminución de las capas de nieve y hielo, así como en el cambio del régimen de precipitaciones. A su vez, la comunidad científica advierte sobre el ascenso del nivel del mar, la inundación de zonas costeras y la pérdida de biodiversidad, entre las amenazas y posibles impactos en los ecosistemas, si no se toman las medidas para frenarlo. Para evitar que ello ocurra, es necesario reducir las emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero (GEI), principales responsables del aumento de la temperatura. Sin embargo, no será fácil, ya que según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), hasta el año 2011 el 65% del carbono compatible con el objetivo de mantener el incremento de temperatura en 2°C ya había sido utilizado. Es por eso que los países deben asumir un fuerte compromiso para llevar a cabo políticas y acciones destinadas a la reducción de las emisiones de GEI, poniendo énfasis en aquellas actividades antrópicas responsables de las mayores emisiones. En particular, se destaca el sector energético, el cual es responsable de alrededor del 70% de los GEI liberados a la atmósfera; la generación de energía para calefacción y electricidad causa el mayor porcentaje de las emisiones del sector energético (40%) (Climate Watch, 2020).

En este sector, la diversificación de las matrices energéticas con fuentes renovables es una de las opciones para reducir las emisiones. A su vez, se considera que estas tecnologías contribuirán a superar el carácter limitado de las fuentes fósiles, las cuales dominan el 80% de la matriz energética mundial, según la Agencia Internacional de Energía (AIE). Paralelamente, es necesario que el avance y aplicación de las fuentes renovables sea acompañado por acciones y políticas tendientes a solucionar la falta de acceso a servicios energéticos de la población dispersa, ante infraestructuras energéticas limitadas y restringidas a los principales centros de consumo.

El informe del Club de Roma en 1972 puso en escena la situación crítica que vivirían los territorios con la profundización de los extractivismos, el crecimiento a cuesta de los recursos naturales y el aumento de la demanda de energías de origen fósil. Por ello, aún aquellos que mantienen en equilibrio su matriz energética, conservan el desafío de centrar los esfuerzos en proyectos que prioricen elecciones desde fuentes descarbonizadas en consonancia con el modelo de transición energética impulsado desde la generación descentralizada, localizada y renovable. Según la IEA (2018) se prevé que para el 2030, 1.000 millones de personas no tendrán acceso a red eléctri-

ca, 2.600 millones no dispondrán de instalaciones para cocinar, pero debido al crecimiento del consumo habrá un incremento del 37% en la producción mundial de energía.

1.2. Objetivos del capítulo

Adscripto a lo enunciado, este capítulo se propone como objetivo, analizar las barreras y las potencialidades para la generación energética a partir de residuos pecuarios, mediante estudios de caso en la Provincia de Buenos Aires (Argentina).

Las investigaciones se apoyan en la recolección, lectura y comprensión de información secundaria además del trabajo de campo. Se priorizan los conocimientos acerca de la producción de fuentes energéticas renovables, la preocupación por los residuos pecuarios y la generación en forma descentralizada y distribuida. Los resultados explican la revalorización de residuos pecuarios a partir de la generación de bioenergía, biogás y de biofertilizantes en un contexto de crisis ambiental/energética. Estos proyectos evidencian estrategias de diversificación de ingresos y multifuncionalidad de los espacios rurales pampeanos, al tiempo que modifican la dinámica multiescalar de los flujos que estructuran los territorios.

1.3. Espacios rurales productores de bioenergía

Los dos estudios de caso que componen el capítulo se localizan en espacios rurales pampeanos. Desde mediados del s. XX con marcada aceleración, los espacios rurales (ER) latinoamericanos entendidos como resultantes de vínculos y trayectorias urbano-rurales; son territorios productivos y consumidos condicionados por los extractivismos, por los enclaves de lo residual, por el poder de actores y acciones desterritorializados y sometidos a procesos de expansión inmobiliaria. Las transformaciones derivadas originan cambios en los ER, entre éstos y los urbanos en un escenario condicionado según los modelos de apropiación y las capacidades de resistencia. Como territorios en tránsito, construyen y/o participan de redes de diferente naturaleza, al tiempo que despliegan estrategias multiescala. Algunos alcanzan instancias de crecimiento cristalizando núcleos dinámicos y vinculaciones estratégicas de integración sistémica; mientras que otros profundizan su dependencia reproduciendo su condición de marginales. Las dificultades para definir y analizar los ER devienen, entre otros factores de los diferentes momentos de adscripción a la globalidad, las diversidades geofísicas, geo históricas, geopolíticas, los vínculos urbano-rurales, sus estructuras societales y la diversidad de enfoques científicos que los abordan.

Los ER eran visualizados como espacios de los agronegocios, espacios mineros/hidrocarburíferos y forestales; actualmente (2021) se avizora un horizonte diferente donde se los visualiza/apropia, además, como proveedores de recursos energéticos convencionales, no convencionales y renovables en un contexto de crisis de reservas, de creciente demanda energética y de cambio climático global. En este escenario, los mercados de las commodities se diversifican, los dispositivos de usos localizados trastocan los territorios a partir de nuevos flujos, actores, poderes, de-

pendencias e infraestructuras; es decir, se materializan los territorios de las energías donde se expresan relaciones de poder espacializadas en forma de conflicto, de sumisión o de superación. Son territorios que se organizan para eficientizar servicios e infraestructuras para producir energía.

Desde mediados del s. XX el modelo económico predominante de carácter lineal se organizó a partir de la extracción, transformación, consumo de recursos ambientales y la producción de residuos; lo cual, sumado al crecimiento poblacional, implicó demandas crecientes de energía, deterioro, contaminación, escasez y exclusión. Las actividades antrópicas vinculadas al sector industrial y al transporte son responsables de importantes emisiones de gases contaminantes. No obstante, es el sector energético el principal causante de las emisiones de gases a la atmósfera (Herrero, 2017). Como consecuencia de ello se genera un desequilibrio energético y la atmósfera retiene más calor. Esto ocasiona impactos en el planeta: acidificación de los océanos, reducción de las capas de hielo y cambios en los valores de precipitación, entre otros. A su vez, los efectos negativos en los diversos ecosistemas afectan a las sociedades, ya que son fuente de alimento y materias primas, reguladores del clima y cumplen con diversos servicios ecológicos, entre otros (Nasa Climate 2020).

En éste, anidan las discusiones acerca de la diversificación de la matriz energética de los territorios, la inclusión de poblaciones alejadas y/o marginales a las redes de energía y el crítico estado ambiental de territorios productores y consumidores finales de fuentes fósiles. Las fuentes energéticas juegan un rol clave en todo este proceso de cambio, apostar a la transición desde fuentes renovables, parece viable desde el modelo de generación distribuida., En base a lo expuesto, sin considerarlo un planteo abarcativo, esta transición parece encauzarse en dos direcciones: proyectos de generación renovables de gran escala alejados de los centros de consumo, o proyectos de producción de energía para satisfacer demandas localizadas. Mientras que en el primer caso se profundiza el modelo de generación centralizada, el segundo, procura avanzar hacia un sistema más descentralizado y distribuido; lo cual involucra no solo la localización de proyectos donde se sitúan los recursos, sino producción de energía en cercanías de las sociedades que la consumen/necesitan. Es así que, un nuevo enfoque se expresa sobre los desechos de diferentes industrias o tipos de producción, lo que anteriormente era considerado "descartable" o "sin valor" comienza a tomar otra posición. Estos desechos acompañados de conflictos de contaminación de agua, suelo y aire se insertan en una nueva cadena de valor. En esa intersección, desechos agroindustriales, crisis energéticas, visualización de residuos como recursos energéticos; se enmarca la bioenergía.

2. Biogás desde residuos orgánicos pecuarios. Contexto nacional

La biodigestión anaerobia transforma los residuos orgánicos (purines, excremento animal, residuos agrícolas y agroindustriales blandos), mediante un proceso biológico complejo y degradativo (digestión anaerobia) en biogás: "(...) mezcla de gases obtenida por degradación microbiana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Está formado por metano (CH₄) en una proporción, que oscila entre un 50%

a un 70% y dióxido de carbono (CO₂), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases (...)” (García Pérez 2019, p.13). Este combustible es capturado y transformado en bioenergía y en biol o digestato (fertilizante orgánico de composición compleja y natural) (Martí Herrero et al. 2016). La biodigestión anaeróbica reduce el volumen de residuos, mitiga la contaminación ambiental en el suelo, agua y aire, y es fuente renovable para producir energía. La digestión anaeróbica y el biogás son versátiles, con lo cual se visualiza la capacidad de descentralización que tiene la energía a partir de materia orgánica, y la posibilidad de su generación a diferentes escalas. Según Pérez (2010) el biogás generado a partir de biodigestión anaeróbica de purines de bovinos tiene un porcentaje de metano CH₄ cercano al 60%, es un producto de alto poder calorífico, valioso como fuente térmica.

Los antecedentes vinculados a la producción de bioenergía presentan diferentes momentos de innovación y aplicación. En algunos países, han estado influenciados por criterios ambientales más que energéticos. En América Latina y el Caribe, la producción de biogás a partir de residuos pecuarios surge a mediados de la década del 70 con pruebas piloto, las cuales demostraron su funcionalidad técnicamente, pero no su importancia para producir bioenergía (Martí Herrero et al. 2016). En 2015, el Comité de Biomasa de la Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER), expresó que existen entre 60 y 80 plantas de biodigestión; de las cuales sólo 20 corresponden a grandes escalas. Por otro lado, en 2019 los representantes de la Red de Biogás y miembros del Programa de Energías Renovables del INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) en el marco del Ministerio de Agroindustria y Energía y Minería con el apoyo de la FAO presentaron el Relevamiento Nacional de Biodigestores (FAO, 2019), el cual enunció los déficits para planificar acciones propicias para la innovación en tecnologías de la biodigestión. Solo el 6% de las plantas relevadas (62 plantas de biodigestión) fueron instaladas con fines energéticos, el resto prioriza la tecnología como solución para el tratamiento de efluentes para el cumplimiento de parámetros de vuelco, es decir, aparecen invisibilizados la generación de biogás, la utilización de sus beneficios y las potencialidades del biofertilizante.

Así, los compromisos internacionales asumidos por Argentina y la necesidad de transitar de un sistema fósil-dependiente y centralizado hacia uno más diverso, accesible y sostenible, promueven una serie de políticas y programas en pos del desarrollo de las energías renovables en la matriz eléctrica. Entre los estímulos más recientes se destaca la Ley N°27.191/15, que fija objetivos a largo plazo en cuanto a la participación de fuentes renovables a través de proyectos de alta potencia adjudicados en la licitación Renovar (Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables). Hasta el momento, se han completado tres rondas de licitación, adjudicando 185 proyectos por una capacidad total de 4725 MW. En abril de 2019 la producción de energía sobre la base de biomasa, biogás o gas de relleno incluyendo proyectos GENREN, RENOVAR ronda 1, 1.5 y 2 y proyectos anteriores a la Ley 26.190, se identifican "(...)16 proyectos conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN), por un total de 137 MW aproximadamente. De ellos, el 80,3% (110 MW) corresponden a 8 proyectos con biomasa y el 5,1% (7,02 MW) a 4 proyectos

con biogás. El 14,6% restante (20 MW) son 3 proyectos de biogás de rellenos sanitarios (LFG). Este conjunto representa el 14,6% del total de proyectos ER del programa RenovAr. Los proyectos de biomasa generan potencias nominales en el rango 2-38 MW, con una potencia media de 12,5 MW (CEARE, 2019)" (Manrique et al. 2020, p. 116).

En este marco normativo se analiza la producción de bioenergía a partir de residuos pecuarios. Las mismas han estado traccionadas por el devenir de las fluctuaciones del mercado internacional en connivencia con las administraciones políticas de turno sin que el deterioro ambiental, la exclusión socioterritorial y la sustentabilidad; fueran una preocupación presente. Así la expansión de la frontera agraria, la intensificación en el uso de insumos, la concentración de tierras, los pools de siembra, el precio de las commodities en el mercado internacional y la necesidad de cubrir la demanda interna de alimento llevaron a la creación del régimen de compensación. Éstos si bien se aplicaron a los diferentes sectores, uno fue a las unidades de producción para engorde de bovinos a corral, feedlot (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Resolución N°233/2011). Los diferentes momentos y apropiaciones han afectado la estructura y la funcionalidad de los ecosistemas donde la agricultura y la ganadería se desacoplan, se especializan y se intensifican (Viglizzo et al. 2001). La ganadería siguió esquemas industriales (feedlot) y otros sistemas intensivos, la agricultura se dirigió a paquetes tecnológicos simplificados y de alta productividad, caracterizados por cultivos transgénicos, siembra directa, mayor uso de fertilizantes y plaguicidas (Viglizzo, Frank, y Carreño, 2005). Los feedlot priorizan el incremento de los índices de carne/ha., transfiriendo tierra productiva a la expansión agraria (Portillo y Conforti, 2009).

Este escenario ganadero junto a la situación del sistema energético argentino conjuga caminos contradictorios para apropiaciones territoriales sustentables; lo cual acelera las decisiones de transición energética, donde la descentralización y la generación distribuida a pequeña escala, son alternativas para la reducción y la mitigación de emisiones. Lo enunciado enmarca nuevos horizontes en los cuales la producción de bioenergía a partir de residuos pecuarios, encuentra posibilidades de materialización en Argentina (Manrique et al., 2020). La generación se enfoca en las relaciones potenciales entre la exploración, producción, distribución y consumo de energía a partir de la biomasa animal. Este entramado de generación y descentralización se origina en un escenario de marcos regulatorios en construcción que pivotean entre administraciones públicas con normativas discontinuas, cambiantes y confusas. Si bien lo expuesto dista de ser exhaustivo, se ponen a disposición del lector elementos explicativos de modelos de administración de políticas públicas disímiles en cuanto al discurso, pero con continuidades vinculadas a la gestión de los territorios.

En estas reacomodaciones territoriales impuestas, las administraciones públicas de Argentina respecto a la apropiación de los recursos energéticos, pivotean entre discursos marcadamente diferentes y gestiones considerablemente semejantes.

3. Estudios de caso. De territorios contaminados a productores de bioenergía

3.1. Descripción general

En el presente apartado se exponen las evidencias y aproximaciones teóricas adscritas a los estudios de caso investigados. Se reúnen avances individuales y colectivos, con eje en las complejidades y el tránsito de los ER hacia territorios de las energías desde estrategias de gestión que transforman residuos en bioenergía.

Los casos en estudio examinan proyectos de producción descentralizada de energía localizados en ER de la pampa argentina. Se trata de proyectos que aprovechan fuentes renovables inscriptos en medidas de promoción pública e impulsados por partenariados público-privados. Los casos son representativos de formas de articulación de actores, de los móviles y barreras que atraviesan los proyectos y de las interacciones que se promueven en los ER donde se localizan. En este capítulo se exponen el Proyecto de biogás en Carlos Tejedor (Caso 1) y el Proyecto piloto de producción de biogás en Los Pinos Partido de Balcarce (Caso 2) ambos localizados en la Provincia de Buenos Aires (Figura 1).

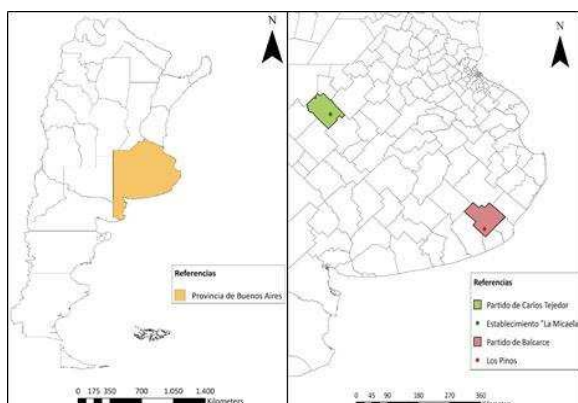


Figura 1. Localización de Carlos Tejedor y Los Pinos (Balcarce) (Fuente: elaboración propia).

3.2. Aspectos metodológicos de ambos estudios de caso

Para los casos de estudio, se utilizó una articulación cuali-cuantitativa privilegiando la perspectiva holística, multidisciplinaria y multiscalar (Martínez Carazo, 2011) La decisión de trabajar con estudios de caso como medios de aproximación a la realidad, refuerza la posibilidad de contrastación de datos (comparación por semejanzas y/ o por diferencias) con las experiencias analizadas en los territorios seleccionados. Si bien no hay acuerdo entre los autores si el estudio de caso se trata de un método

de investigación o de una estrategia, sí hay consenso sobre el potencial que posee para producir información sobre singularidades, particularidades, acciones y situaciones en respuesta a cómo y por qué ocurren. De este modo, los resultados —si bien no generalizables— posibilitaron la construcción de síntesis y de nuevas aproximaciones conceptuales.

Se triangularon datos de diversas fuentes secundarias —bibliografía, informes, legislación, artículos periodísticos, estadísticas y cartografía—. Este análisis incluyó estudios e informes técnicos de diferentes niveles y escalas espaciales, ejercicio que aportó tanto conocimientos teóricos, como metodológicos, acerca de las experiencias a nivel internacional, nacional y provincial. Los datos relevados en esta etapa sirvieron asimismo como base para la identificación y selección de los informantes claves, pero fundamentalmente para la preparación del trabajo en terreno, identificando los núcleos temáticos y problemáticos del relevamiento de información.

La recolección de datos primarios (2017 y 2019) se realizó a partir de entrevistas semiestructuradas a informantes claves durante jornadas de trabajo en terreno donde se identificaron actores, formas de articulación, móviles y barreras asociadas a los procesos. El propósito fue identificar aquellas evidencias que permitieran comprender los procesos de cambios; cómo influían las apropiaciones de recursos energéticos y por qué los actores, acciones y redes trastocaban los territorios. Las mismas se realizaron a actores públicos (investigadores, secretarios de producción, ambiente y finanzas de los Municipios) privados (población residente, referentes locales, productores) y colectivos (cooperativas, asociaciones civiles y miembros de la sociedad de productores ganaderos en el caso de de Carlos Tejedor). Los datos contribuyeron a dar luz a las redes, vínculos, obstáculos e impactos, muchas veces intangibles. Esta interacción posibilitó la obtención de datos estructurados alrededor de las categorías construidas: espacios rurales en transformación, producción de bioenergía a partir de residuos pecuarios, puja de poderes. A su vez, se construyeron aproximaciones teóricas: i- Categorización, apoyada en datos particulares considerando la transformación de residuos pecuarios en bioenergía. ii- Estructuración, a través de la cual se vincularon las categorías y se jerarquizaron los conocimientos presentes y los necesarios, es decir, los datos que posibilitaron comprender las mudanzas de los territorios y los poderes condicionantes. iii-Contrastación de los resultados obtenidos con datos provenientes de otras fuentes, en particular aquellos que postulan las potencialidades de los ER como productores de energías. iv- Teorización, cuando las contrastaciones sucesivas posibilitaron asociar en unidades teóricas los conocimientos producidos, para considerar a los ER como escenarios de confluencia sistémica a partir de estrategias que transforman un problema en solución ya que los mismos se muestran no sólo como productores de materias primas sino, además, como generadores de bioenergía a partir de residuos.

CASO 1. Proyecto “La Micaela”

En la unidad de producción ganadera “La Micaela”, ubicada a 2,5 km de la localidad de Carlos Tejedor (Figura 2.), se visualizan numerosos obstáculos para la producción bioenergía, pero también oportunidades.

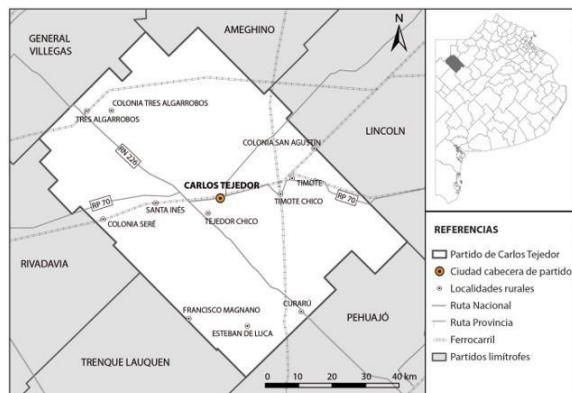


Figura 2. Carlos Tejedor. Provincia de Buenos Aires (Fuente: elaboración propia).

Para el caso en estudio, se plantearon tres etapas de trabajo:

1- Análisis documental, acceso a la información secundaria para construir los antecedentes, identificar elementos conceptuales sobre las problemáticas planteadas en torno a la producción de bioenergía. Se analizó la información sistematizada con origen en organismos técnicos, instituciones académicas, organizaciones sociales y agencias de gobierno y se hizo hincapié en el monitoreo de proyectos de generación distribuida impulsados por las cooperativas de distribución de electricidad; así como en el reconocimiento de las estrategias energéticas para el aprovisionamiento a poblaciones dispersas. Esta sistematización posibilitó la interpretación de procesos, sus particularidades y la comprensión de las problemáticas de acceso a fuentes de energía. Las notas de campo, fotos, grabaciones, folletos y diarios sirvieron como registro de información.

2- Recolección de datos primarios para estructurarlos alrededor del objetivo así comprender las múltiples aristas que muestran la complejidad de las interacciones. Los cuestionarios realizados a la población residente (veinte 20), relevaron información para construir la base de datos, respecto al conocimiento del Proyecto, las dificultades enunciadas por la discontinuidad del servicio y el acceso a la energía. Complementariamente, las entrevistas semiestructuradas (productor ganadero/energético, referente de la Cooperativa Eléctrica de Carlos Tejedor, Secretario de Obras y Servicios del Municipio, Vicepresidente de la Sociedad rural y Director de Producción del Municipio) permitieron identificar y caracterizar discursos, intereses, aspiraciones y conflictos; como también los mecanismos contruidos para alcanzar el acceso a servicios energéticos y las barreras que encuentran en su implementación.

3- Análisis de los datos relevados tratados a través de diferentes técnicas. En esta etapa se interpretaron las estrategias de los actores claves en el proceso, las acciones individuales y colectivas y se analizaron los espacios rurales no sólo como productores de materias primas sino además como generadores de bioenergía y biofertilizante a partir de residuos. El desarrollo del proyecto originado en la articulación público/privada, implicó tres años de negociaciones (2011-2014). La firma del convenio y la materialización de gestiones se instrumentaron con la participación del referente de la unidad productiva y la empresa Biogás como privados, Programa Provincial de Incentivos a la Generación Distribuida (PROINGED), el Sistema de Transacciones Físicas y Económicas de Energía Eléctrica Distribuida (SISTFEED), Cooperativa y Municipio de Carlos Tejedor como públicos. Para la compra del grupo electrógeno, la Provincia de Buenos Aires otorgó un crédito a la Cooperativa quien deberá pagarlo con el 20% de la bioenergía producida que se inyecta a la red.

El biodigestor (Figura 3) es de mezcla completa o continua, según la FAO (2019). Estos modelos de biodigestor son cilíndricos con sistemas de agitación mecánica (automatizados) o manual y se emplean mayormente para tratar sustratos con un porcentaje de sólidos del 3 al 20%. La característica que define a este tipo de biodigestores es que la carga añadida periódicamente se mezcla casi en su totalidad con el contenido ya presente en cámara de digestión. La intensidad y periodicidad del mezclado debe ser controlada ya que puede perjudicar el equilibrio bacteriano.

Este biodigestor es de paredes y piso de hormigón, está forrado con lana de vidrio en el medio para que no pierda temperatura y tiene un sistema de doble membrana de PVC con cámara de aire que permite resguardar el equipo mecánicamente y lograr una mejor aislación. La membrana está estirada para que el viento y lluvia no le hagan daño. Debajo de ésta hay otra que varía con la presión del metano. Por la cañería de alimentación circula un fluido de calefacción para aumentar la temperatura.



Figura 3. Biodigestor de mezcla completa en Carlos Tejedor (Fuente: elaboración propia, Carlos Tejedor, octubre de 2017)

El proceso se realiza diariamente, se barre el estiércol de 500 animales se vuelca a un colector central para ajustar y homogeneizar en la cámara de recepción. El material orgánico es conducido a una cámara donde es diluido con agua hasta alcanzar la concentración ideal. Luego se inserta con una bomba estercolera en el biodigestor, donde se produce la descomposición de la materia a partir de las bacterias anaerobias con la temperatura y agitación adecuadas, las cuales se establecieron a partir de ensayos.

La digestión anaeróbica es compleja, tanto por el número de reacciones bioquímicas como por la cantidad de microorganismos involucrados. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas: I) Hidrólisis; II) Acidogénesis; III) Acetogénesis; IV) Metanogénesis (FAO, 2019). Como sucede en todo proceso biológico, la digestión anaerobia se efectúa favorablemente o no dependiendo de las condiciones que estén presentes en el medio (Acosta y Abreu, 2005). La eficiencia del proceso depende de diversos factores ambientales tales como: el pH, la temperatura, los ácidos grasos volátiles, el potencial redox, la presencia de inhibidores, la presión parcial del hidrógeno, los nutrientes, entre otras. Los factores operacionales como son la agitación, el tiempo de retención hidráulico, la carga volumétrica, entre otros son constituyentes del proceso. Para los controles se instalaron 6 cámaras de registro de los parámetros El biodigestor mantiene el sustrato a 35°-36° C. en verano y a 30° en invierno con la agitación adecuada según controles diarios.

El digestor tiene una capacidad de 460 m³. El biogás generado pasa por tres procesos de acondicionamiento previo a la inyección a la red:

- Disminución del H₂S (ácido sulfhídrico) con chips de madera.
- Eliminación de impurezas con filtro de carbón activado.
- Reducción de humedad a niveles aptos para su utilización como combustible por medio de un Lecho de Sílice (contenedor de acero inoxidable). Previo a la incorporación al generador eléctrico, pasa por un soplador para elevar la presión, el transformador baja la potencia de 380V a 300-200V y desde allí se articula a la red de distribución.

Este biodigestor genera 1000 kilowatts (1 MW) diario, el equivalente al consumo promedio de 100 familias. Lo producido se incorpora a la red debido a que es mayor lo que recibe por kilowatt producido que el costo del kilowatt consumido (2017). Por otro lado, el sistema genera 35 m³ de efluentes/biofertilizantes/día que se distribuyen en la unidad productiva en reemplazo de componentes químicos, aunque está en discusión la cantidad de patógenos que permanecen después del tratamiento de la biodigestión anaerobia. De todos modos se destaca el beneficio que se expresa en menos compra de fertilizantes químicos. Si bien se realizaron pruebas con el biofertilizante en doce parcelas de cebada y maíz, las mismas mostraron que el fertilizante químico generó mejores resultados, pero aun así el biofertilizante se posiciona porque disminuye los costos económicos y los ambientales.

Tabla 1. Potencialidades y obstáculos en la producción de bioenergía. Carlos Tejedor

	POTENCIALIDADES	OBSTÁCULOS
A M B I E N T E	30 mil kilowatts por mes que no se compran a la empresa de energía distribuidora del Norte S.A. (EDEN).	Inversión inicial: 4-5 millones de pesos (2017).
	800m ³ biogás/día = 1000 kilowatts- 1 mega diario	Inversión en adaptación de infraestructura (hormigón).
	30 mil kilowatts/ mes = 100 mil pesos mensuales	Gasto fijo: Glicerol para aumentar eficiencia del biodigestor
	Hormigón: mejora del 20% en ganancia de kilos de carne por animal	
	Diversificación de la unidad productiva = agrícola ganadera-energética	
E C O L Ó G I C A S	Tratamiento de 250kg diarios de residuo de feedlot (estiércol)	Cuestiones técnicas: equilibrio de parámetros claves (T° y agitación)
	35m ³ de efluentes/biofertilizantes/día	Sistema sensible a perturbaciones (cambio en alimentación animales)
	Inyección a la red, a través de la Cooperativa Eléctrica, con una potencia de 70 kW	Agregado de glicerol para aumentar la eficiencia del tratamiento anaerobio
	Aporte a la matriz energética de energías limpias 30 mil kilowatts/ mes	
	Reducción de generación de Gases de Efecto Invernadero	
	Círculo virtuoso de nutrientes en el suelo	
	Mejor higiene y estado de los animales	
Mejora de olores en el establecimiento		
S O C I A L E S	Innovación tecnológica en Carlos Tejedor.	Compleja articulación actores
	Impulso a diálogo y relaciones entre actores diversos	Falta de legislación/antecedentes
	Inspiración para reproducción en otras unidades productivas	Escaso conocimiento de los pobladores de Carlos Tejedor
	Difusión de conocimiento a partir de visitas al lugar de varias instituciones educativas	Trabas burocráticas para la comercialización del biofertilizante

No se ve traducido en la tarifa de los pobladores el beneficio de generar energía a partir de residuos.

Cuestiones políticas

(Fuente: elaboración propia en base a datos de salida de campo (2017). Rev. Super Campo (2018). Rev. Valor Carne (2016)).

Los resultados enuncian un nuevo uso que implicó el paso de un actor ganadero cárnico a productor de bioenergía. Si bien no se relevaron datos asociados a los costos del manejo de efluentes antes de la instalación y funcionamiento del biodigestor; se enunció que la principal motivación fue la necesidad de solucionar el problema de la contaminación que se producía con el sistema engorde por feedlot.

CASO 2. Proyecto Los Pinos

El Proyecto “Los Pinos” es una Unidad Demostrativa de Producción de Biogás en construcción desde 2015 en el Partido de Balcarce (Figura 3). El mismo es financiado por el Instituto alemán Wuppertal. El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, la Universidad Nacional de Mar del Plata, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, asesoran técnicamente. El biodigestor se localiza en un predio cedido por la empresa Ferrosud en un territorio caracterizado por usos avícolas y porcinos. Ante la ausencia del servicio de gas natural por red y los problemas generados por la producción avícola y porcina., los residuos (de producción avícola y porcina) se visualizaron como recursos para generar biogás y al mismo tiempo resolver la problemática ambiental.



Figura 4. Diagrama del proyecto de biogás Los Pinos-Balcarce. (Fuente: modificado de INTA 2018)

Este proyecto piloto se compone de un biodigestor de concreto, de rango mesofílico, de 100 m³, de mezcla completa, 6 metros de diámetro y 3,6 metros de altura. El mismo ha sido financiado mayoritariamente por el Instituto Wuppertal de Alemania, a través de una convocatoria a nivel mundial para proyectos demostrativos de soluciones energéticas renovables a pequeña escala, lanzada en 2015. Cuenta con la participación de diversos actores que operan multiescalarmente: investigadores, actores públicos, privados, productores pecuarios y la Cooperativa conformada para la administración de la bioenergía producida. Una vez en funcionamiento, el biogás será acondicionado e inyectado a una red de la cual formarán parte 10 domicilios (un 5% del total) y permitirá proveer bioenergía a 10 cocinas anafes. A su vez, desde el grupo de científicos llevan a cabo investigaciones para poder emplear el lodo residual (subproducto de la biodigestión) como biofertilizante. En un principio, la fracción sólida se compostaría con otros residuos orgánicos mientras que la líquida, previo tratamiento, sería utilizada como agua de riego.

Los obstáculos financieros y la devaluación dilataron la concreción del proyecto. Si bien se han recibido subsidios (Municipio, Provincia y Nación) han sido destinados a gastos no previstos. Poca experiencia en la construcción de biodigestores y discontinuidad de las acciones locales completan el escenario de dificultades. Sin embargo, se destaca la conformación de un equipo de trabajo de carácter interdisciplinario e interinstitucional, la construcción de un biodigestor de menor escala en la escuela del asentamiento, la conformación de una Cooperativa, el empleo de mano de obra, la adquisición de insumos de industria nacional y la generación de energía distribuida y descentralizada que será consumida por la comunidad productora. Se inducen de esta manera, beneficios a los productores y los residentes, al tiempo que se desafían estrategias de diversificación en consonancia con la reducción de gases efecto invernadero y, por ende, en la lucha contra el cambio climático.

4. Reflexiones. Bioenergía descentralizada desde los espacios rurales

En este contexto de fenómenos globales con efectos regionales, los ER resultan de las articulaciones complejas entre políticas públicas, proyectos, entornos regionales y conectividad. Las nuevas apropiaciones territoriales desafían las diferencias a partir de procesos multiescala que, al situarse, trastocan las dinámicas de las redes y de los flujos materializando cambios en los usos del suelo, en respuesta a los intereses/necesidades de los actores (públicos, privados colectivos). Si bien ciertas posturas analizan la expansión de los extractivismos en estos espacios, como procesos de despojo y acumulación (Svampa 2019; Harvey 2004); el reto de este capítulo es ponderar los nuevos usos a partir de proyectos de producción de bioenergía, que buscan satisfacer las demandas situadas (necesidades, intereses, gestión).

El desafío de construir un futuro bajo en carbono concede visibilidad y protagonismo a los territorios con presencia de recursos energéticos renovables (sol, viento, agua, biomasa) desde proyectos situados en ER disponibles. En estos territorios se producen rupturas, pasan de ser productivos como el de Carlos Tejedor, de servicios y población con vínculos laborales rurales como el de Los Pinos-Balcarce; a ser territo-

rios consumidos como oferentes de recursos energéticos descarbonizados y proveedores de servicios ecosistémicos. Entender las mudanzas de los ER, amerita los análisis multidimensionales que disponen de herramientas para comprender los escenarios, las vinculaciones, las alianzas, los pactos y las negociaciones traccionados por las diferentes formas de acción colectiva, privada y pública. Por lo que, profundizar los estudios acerca de los flujos, densidades, jerarquías, usos y articulaciones con proyectos de producción de energía a partir de fuentes renovables, aportará evidencias para comprender las estructuras híbridas resultantes de la versatilidad y complejidad de los espacios rurales.

Ahora bien, ¿cuáles son las necesidades y las potencialidades de estos ensambles territoriales productores de bioenergía?

- Necesidades de la población ante la intermitencia del servicio eléctrico como es el caso de Carlos Tejedor. Este proyecto de generación responde a acciones públicas, privadas y colectivas. La disponibilidad de dispositivos de usos, el compromiso de la población beneficiada, el aporte de conocimientos técnicos por parte de la Cooperativa y la gestión realizada por el Municipio; coadyuvaron en la transformación de un territorio residencial/productivo agrario en un territorio productor de bioenergía.
- Necesidades de los residentes para acceder al servicio de gas de red y la posibilidad de gestionar residuos pecuarios para producir biogás cuidando el ambiente, como el caso de Los Pinos-Balcarce. El tratamiento de los residuos pecuarios, el consumo energético responsable y la importancia del cuidado del ambiente, materializan el paso de un territorio productivo a uno con nuevos usos bioenergéticos. La innovación y la ciencia han direccionado estas mudanzas mientras que los residentes y el Municipio reconstruyen a partir de acciones territorializadas.

Estos nuevos usos energéticos ponderan las dinámicas territoriales, abonan la desactivación de la dicotomía rural-urbana a partir de nuevos flujos y redes que cambian la direccionalidad de los procesos. Son territorios que experimentan posibilidades y desafíos, expresan complejidades resultantes del entrecruzamiento de redes de poder regionales situadas y otras deslocalizadas.

5. Conclusiones de los estudios

En el marco de los esfuerzos globales por el cambio climático, de incertidumbre frente al precio internacional de hidrocarburos y de evoluciones societales que priorizan elecciones más sustentables; la transición energética impulsa acciones tendientes a la generación de energía desde fuentes renovables, localizadas y distribuida. El capítulo aborda cómo la producción de bioenergía renovable en ER reconfigura la distribución de bienes y servicios ambientales, en un escenario de cambio global estimulado por el consumo de productos y territorios. La articulación de actores - públicos, privados, asociativos, cooperativos- en torno a las iniciativas de generación distribuida y los beneficios ambientales promovidos por el aprovechamiento de recursos situados, resignifican los procesos de construcción territorial.

Los estudios de caso posibilitaron una aproximación a la realidad a partir de la contrastación de datos. De este modo, los resultados –si bien no generalizables – han permitido la construcción de síntesis acerca de las bondades y de los obstáculos de los proyectos.

Los proyectos de baja generación de potencia distribuida expuestos en este capítulo, se localizan en territorios con potencialidades y necesidades expresadas diferencialmente, gestionadas a partir de negociaciones que se pronuncian desde dispositivos de usos (soporte), redes de servicio (distribución) y redes de comando que optimizan el uso de las infraestructuras (teleinformática); todo ello en conjunción para producir energías renovables. Por ello, los procesos promovidos por la localización de proyectos de aprovechamiento energético, activan complementariedades entre territorios singulares y pone de relieve la necesaria articulación entre actores gubernamentales, con otros -privados, asociativos, cooperativos, colectivos-, y replantea las tradicionales formas de gestión de los recursos energéticos.

En este entramado, las cadenas de valor globalizadas condicionan las neorealidades rurales de acumulación territorial como resultado de transformaciones direccionadas por actores, acciones y redes adscriptos a un contexto multiescalar. En el caso de la producción de bioenergía, las reconstrucciones se observan en el paso de territorios contaminados a territorios productores de bioenergía en un entorno de regulaciones en desarrollo.

En Argentina las administraciones públicas distan mucho de entender este escenario, de ser responsables con la apropiación de los recursos, de visualizar los límites biofísicos y de reconocer que la producción de commodities beneficia a las transnacionales y a los gobernantes de turno; trastocando en forma simultánea la matriz territorial e induciendo marginalidad, despojo y deslocalización.

Los discursos enuncian las bondades de las fuentes descarbonizadas, el camino hacia la transición energética, la importancia de los recursos energéticos situados y la generación distribuida para la gestión de territorios sustentables; ante estos augurios si la gestión está deslocalizada y consumidores/beneficiarios, alejados de los territorios de las energías; la búsqueda de transición con inclusión energética profundizará los territorios de los extractivismos, incrementará la población sin acceso a las redes y aumentará los pasivos ambientales en los territorios poseedores de los recursos.

Los estudios muestran que los ER son reconocidos como territorios poseedores de recursos energéticos y como enclaves de localización de lo residual. Entender las tensiones situadas en relación a las transformaciones globales parece uno de los desafíos de este nuevo orden pluripolar en tránsito hacia una re-distribución del poder en el planeta.

Como cierre se pone a consideración una idea y una pregunta: con la inversión de situaciones y de contradicciones situadas es visible que los ER están transitando

mudanzas y reacomodamientos, la incertidumbre es ¿si las estrategias de los actores convergen hacia la distribución y la descentralización o hacia la profundización de las asimetrías adscriptas al poder de la ciencia, el capital y la gestión centralizada y deslocalizada?, de las respuestas dependerá el tránsito hacia la diversidad, la multifuncionalidad o hacia la profundización de las asimetrías.

Ensayar nuevas categorías para develar las hibridaciones nacientes e interfaces resultantes es un compromiso. Estos territorios más allá que sean rurales o menos rurales, son matrices que muestran la hibridación, son ensamblajes territoriales.

6. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

En ambos estudios se manifiestan una sumatoria de obstáculos vinculados con las inversiones iniciales. Es decir, la construcción de los biodigestores es una barrera muy difícil de sortear.

La ineficiencia de las administraciones públicas se expresa como otro de las barreras para el desarrollo de los proyectos de bioenergía.

Los territorios rurales son depositarios de discontinuidades espacio/temporales convergentes y contradictorias que los de-construyen permanente.

En los espacios rurales latinoamericanos se invisibiliza el agotamiento/deterioro ecosistémico y la conflictividad social, mientras que en los dos casos de estudio se diseñan alianzas para un futuro descarbonizado más allá de los procesos extractivistas y de acumulación.

El acompañamiento de las administraciones públicas a través de la gestión de política energética y crediticia en un contexto de inestabilidad financiera, son obstáculos para la transición energética.

Los residuos pecuarios transformados en bioenergía promueven trayectos de co-construcción territorial (Caso 1 y 2).

La materialización de proyectos de bioenergía en un entorno de administraciones políticas energéticas difusas, discontinuas y cambiantes obstaculizan el avance de los proyectos (Caso 1 y 2).

El Proyecto (Caso 2) está condicionado por barreras económicas, financieras y organizativas que dificultan su continuidad.

Referencias

Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 39(1), 35-48.

-
- Agencia Internacional de Energía (AIE) (2018). World Energy Balances 2018. Disponible en: <https://www.iea.org/events/statistics-world-energy-balances-2018-overview>
- Agencia Internacional de Energía (AIE), Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), División de Estadística de las Naciones Unidas (UNSD), Banco Mundial y Organización Mundial de la Salud (OMS) (2020). Informe de seguimiento del SDG7 2019. Disponible en: https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/downloaddocuments/tracking_sdg_7_2020-full_report_-_web_0.pdf
- Agencia Internacional de Energía (IEA). Key world energy statistics (2012). OECD, I. Tech. rep., Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency.
- Climate Watch (2020). Global Historical Emissions recuperado de <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. de Andrés Ruiz, C., & Iranzo García, E. (2011). Desarrollo de las energías renovables y cambios paisajísticos: propuesta de tipología y localización geográfica de los paisajes energéticos de España. En V. Gozávez Pérez y J.A. Marco Molina (Eds.), Energía y Territorio: dinámicas y procesos (pp. 97-107). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/47252> de Mattos, C. (2018). Encrucijada ante los impactos críticos de un crecimiento urbano financiarizado. Documento de trabajo IEUT N° 4.
- De Gouvello, C., & Durix, L. (2008). Maximizing the Productive Uses of Electricity to Increase the Impact of Rural Electrification Programs: An Operational Methodology. Washington, D.C. 20433, U.S.A: Editorial ESMAP.
- FAO. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires, Argentina: Editorial FAO. Disponible en :<http://www.fao.org/3/ca5082es/ca5082es.pdf>
- FAO. 2019. Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biogestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico. Colección Documentos Técnicos N° 6. Otras entidades involucradas: INTI; Ministerio de Energía y Minería; Ministerio de Agroindustria. Buenos Aires Argentina. Editorial FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5190ES/>
- García Pérez, V. (2019) Manual de biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus subproductos. Buenos Aires Argentina. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio climático. Provincia de Buenos Aires. Disponible en: [PDF] gba.gob.ar MANUAL DE BIOGÁS. 2019.
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014. Informe de Síntesis. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Manrique, S. M et al. (2020). Panorama de Tecnologías de bioenergía en Argentina. (pp. 115-125). En ----, Recursos, Tecnologías, Transferencias y Políticas: Una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía en Iberoamérica. Manrique S, Torreiro Villariño Y, Contreras Rodríguez ML, Sánchez Hervás JM, Garrido S, Curbelo Alonso A. (Editores) ISBN 978-84-15413-32-5. CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el
-

-
- Desarro-Illo). Madrid, España. <http://www.cytel.org/es/biblioteca/primer-libro-de-la-red-rebibir-t>
- Martí Herrero, J., Pino Donoso, M., Gallo Mendoza, L., Pedraza, G. X., Rodríguez Jiménez, L., & Viquez Arias, J. (2016). Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biogestores de pequeña y mediana escala en LACRed de biogestores para Latinoamérica y el Caribe, RedBioLAC (No. P06 18). RedBioLAC.
- Martínez Carazo, P. C. (2011). El método de estudio de caso Estrategia metodológica de la investigación científica. *Revista científica Pensamiento y Gestión*, (20), 165-193.
- Pérez, J. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. (Tesis de Ingeniería) Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Pérez-Martínez, M. (2016). Las territorialidades urbano rurales contemporáneas: Un debate epistémico y metodológico para su abordaje. *Bitácora Urbano Territorial*, 26(2), 103-112. <http://dx.doi.org/10.15446/bitacora.v26n2.56216>
- Portillo, J., & Conforti, A. (2009). Feedlotización de la ganadería Argentina. VI Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales. Buenos Aires, 11(1), 2.
- Svampa, M. (2019). Las fronteras del neoextractivismo en América Latina: conflictos socioambientales, giro ecoterritorial y nuevas dependencias. <https://doi.org/10.14361/9783839445266>
- Teubal, M. (2010). Del paro agrario a las elecciones de 2009: tramas, reflexiones y debates. Editorial Antropofagia.
- Viglizzo, E. F. (2001). La trampa de Malthus: agricultura, competitividad y medio ambiente en el siglo XXI. Buenos Aires Argentina. Editorial EUDEBA.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L., Brown, A., Martínez Ortíz, U., Acerbi, M., & Corcuera, J. (2005). Ecorregiones.

Páginas web

- CADER (Comité de Biomasa de la Cámara Argentina de Energías Renovables). (2020). Cámara Argentina de Energías Renovables. <https://www.cader.org.ar/>
- CONICET. (2017, 13 noviembre). Cuando la pasión y el compromiso de la ciencia empoderan a una comunidad. Recuperado 24 septiembre, 2019, de <https://www.conicet.gov.ar/cuando-la-pasion-y-el-compromiso-de-laciencia-empoderan-auna-comunidad/>
- Diario La Vanguardia. (2019, 16 mayo). Video. Moscas en Los Pinos, el reclamo de los vecinos. Recuperado 24 septiembre, 2019, de <http://www.diariolavanguardia.com/noticias/22331-video-moscas-en-los-pinos--elreclamode-los-vecinos/>
- Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. (s.f.). Potencial de Biogás PBA. Recuperado de https://www.gba.gob.ar/agroindustria/direcci%C3%B3n_de_sustentabilidad_medio_ambiente_y_cambio_clim%C3%A1tico/potencial_biogas
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE (2009). Diario Oficial de la

-
- Unión Europea, 5, 16-62. <https://www.idae.es/directiva-europea-de-energiasrenovables#:~:text=La%20Directiva%202009%2F28%2FCE,la%20energ%C3%ADa%20procedente%20de%20fuentes>
- Echarte, M. M. (2018, 2 julio). Unidad demostrativa de producción de biogás en Los Pinos: un ejemplo de sinergia academia-sociedad-gobierno. Recuperado 29 septiembre, 2019, de Producción de biogás en Los Pinos. Un proyecto construido desde la sinergia entre la Academia, la Comunidad y el Estado 132 <https://inta.gob.ar/documentos/unidad-demostrativa-de-produccion-de-biogas-en-los-pinosun-ejemplo-desinergia-academia-sociedad-gobierno>
- GENREN (Programa de Generación de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables) <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/169410/201708>
- INDEC, D. (2010). Censo Nacional de Población Hogares y Viviendas. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. República Argentina.
- INTA (2012), publicado en Construir TV Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Resolución N°233/2011 (2011). https://serviciosucesci.magyp.gob.ar/principal.php?nvx_ver=9725
- PROBIOMASA (Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa). (2020) <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/>
- PROINGED (Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida) (2020). <https://www.proinged.org.ar/>
- RENOVAR (Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables) (2020). <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/energia-electrica/renovables/renovar>
- SUPER CAMPO de la huerta a la estancia (2018) "Feedlot: Kilos de Carne, Energía y Fertilizantes". Por Eduardo Bustos para Super CAMPO. Disponible en: <http://supercampo.perfil.com/2018/07/feedlot-kilos-de-carne-energia-yfertilizantes/>
- VALOR CARNE. Información para la nueva ganadería (2016). "Primer feedlot que vende energía eléctrica". Por Liliana Rosenstein, Editora de Valor Carne. Disponible en: <https://www.valorcarne.com.ar/primer-feedlot-quevende-energia-electrica/>

CASO XX. Estado de las Energías renovables en el Perú

Henry García Bustamante¹, Mary Flor Césare Coral², Pierina Neyra Vargas²,
Rita Cabello Torres², Carlos Ugarte Alván², Christian Valencia Albitres².

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima 32, Perú.

²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 12, Perú.

Resumen. El Perú es uno de los miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y uno de los países firmantes del Acuerdo de París en el 2015, cuyo objetivo es bajar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, es importante recalcar que el Perú presenta bajas emisiones, pero es altamente vulnerable al cambio climático, por ello esta ratificación significa un compromiso para diversificar las fuentes de energía limpia. El objetivo de este trabajo es realizar una revisión sobre el estado de las energías renovables en el Perú, incluyendo los acuerdos y normativas a nivel nacional e internacional, que se han adoptado con respecto a bajar las emisiones involucradas en la generación de energía convencional hacia la transición a las energías renovables con la finalidad de llevar electricidad de forma segura y oportuna a las zonas más aislada del país y contribuir al SEIN, cambiar el uso del petróleo en el parque automotor y en el sector transporte, generando el menor impacto con los cambios de fuentes de energía limpia. Así como la incorporación de concesiones de energía renovable no convencional.

* Correspondencia: Mary Flor Césare C.E-mail: mcesare@lamolina.edu.pe

1. Introducción

1.1. Contexto

En la actualidad el desarrollo económico de países tanto desarrollados como poco desarrollados está basado en su alto consumo energético provenientes de combustibles fósiles y sus derivados, para desarrollar sus actividades tanto industriales como domésticas generando altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) que afectan al medioambiente, así el diario BBC NEWS indicó que en el año 2017, China fue el país que emitió más toneladas de CO₂ a la atmósfera, pero que Estados Unidos, es el mayor emisor de CO₂ desde hace 160 años, así mismo mencionó que el Centro de Análisis de la Información sobre las Concentraciones de CO₂ señaló que en el periodo 1850 al 2011 Estados Unidos fue responsable del 27% de estas emisiones a nivel mundial. Por ello muchos gobiernos se ven en la necesidad de integrar en su matriz energética un mayor porcentaje de alternativas de generación de energías por fuentes más amigables como son los recursos energéticos renovables (RER). Así en el año 2015, en la COP21 muchos países firmaron el compromiso de reemplazar el uso de combustibles fósiles en su matriz energética por estas fuentes, con el objetivo de bajar sus emisiones de GEI y de esta forma mitigar los efectos del calentamiento global.

Frente a esa situación, el Perú no es ajeno a esta realidad, así desde el año 2015 forma parte de los 196 países firmantes del Acuerdo de París (COP21), comprometiéndose a incorporar en su matriz energéticas el uso de energías renovables, y de esta manera reducir su alta dependencia de los combustibles fósiles y sus derivados, lo cual permitirá por un lado bajar las emisiones de GEI producidos por la quema de estos combustibles y además cumplir con los compromisos firmados en el marco del Acuerdo de París. De esta manera, para el año 2030 el Perú tiene como meta incorporar hasta el 15% de RER no convencionales en la matriz energética (Gálvez, 2021).

Así mismo la Política Energética Nacional del Perú 2010 - 2040 (D.S N°064-2010-EM) plantea que el sistema energético debe satisfacer la demanda nacional de energía de manera confiable, regular, continua y eficiente, con la diversificación de la matriz energética con fuentes de energías renovables, dando énfasis a la eficiencia energética, que permita bajar emisiones de carbono, minimizando el impacto ambiental de forma sostenible (Gálvez, 2021).

En este sentido, para el año 2019 se tuvo un incremento del consumo de energía de 1.8% al del 2018, observándose que el consumo de gas natural creció en 3,7%, Petróleo 1,7%, Hidroeléctrica 2,4% y las energías renovables en 10,6% observándose que el consumo de carbón disminuyó 32.6%, desde el 2003 se observa que el consumo de gas natural presenta el mayor crecimiento y que la energía obtenida por las hidroeléctricas se mantiene constante hasta la actualidad (OSINERGMIN. 2020).

Así mismo cabe recalcar que hay una gran desigualdad en el acceso a la energía en las áreas rurales con respecto a las zonas urbanas, debido a la baja rentabilidad técnica y/o económica de conexión con los sistemas interconectados, para el año

2019 el Plan Nacional de Infraestructura para la Competitividad (PNIC) concluyó que la inversión per cápita necesaria para cubrir la población sin electrificar en el Perú sería de 1.700 soles aproximadamente, basados en la información prevista por el MINEM. Considerándose principalmente la implementación de paneles solares (sistemas fotovoltaicos) y la ampliación de las redes del sistema eléctrico nacional (Jaramillo, 2020).

Por lo tanto, al analizar la evolución del empleo de las energías renovables (hidroeléctricas, gas natural, energía solar, energía eólica y biomasa), hay varios aspectos por considerar. El primero, el tipo de uso final. Básicamente las energías renovables se emplean para tres grandes usos (generación de electricidad, generación de calor y fuerza motriz). Otro aspecto a tener en cuenta es el ámbito donde se da el uso, es decir si se emplea en la ciudad como parte de un gran sistema o si se utiliza de manera aislada. Las características de los sistemas que utilizan energías renovables tienen una amplia diferencia si se utilizan en el ámbito rural (generalmente son independientes o abastecen sistemas aislados), o si se utilizan en el ámbito urbano (en donde frecuentemente están conectados a grandes sistemas centralizados).

Con respecto a la biomasa residual en el Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM) informó que en el 2019 se generó 19 mil toneladas diarias de residuos municipales de los cuales el 50% es generado en Lima y Callao, cuya composición presenta 54% de materia orgánica, y sólo el 52% son dispuestos en rellenos sanitarios, de estos una fracción de los residuos orgánicos es cogenerada en la Planta de bioenergía de Huaycoloro, el resto termina en botaderos clandestinos emitiendo gases de efecto invernadero. Además, el país es exportador de materia prima, en relación con el comercio de vegetales, generando biomasa residual que no es usada para la generación de energía, considerándose un mercado importante. De otro lado, el mercado interno en la agricultura y las actividades agroindustriales son los que generan importantes cantidades de residuos que no son aprovechados de manera conveniente, la falta de cohesión entre las actividades científicas y la empresa es una de las brechas que limitan la transferencia tecnológica, sumado a ciertos intereses privados que obstaculizan el desarrollo de la diversificación de la energía.

1.2. Normativa nacional e internacional

En la década de 1990 en el Perú se produjo la reforma energética, la cual está contenida en la Ley General de Hidrocarburos y la Ley de Concesiones Eléctricas.

En los últimos años, el Estado adoptó una política decidida a introducir fuentes renovables no convencionales de generación eléctrica (recursos energéticos renovables o RER), con el objetivo de mitigar las emisiones de GEI mediante la promulgación del Decreto Legislativo N°1002- Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables, dado que el Perú es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático por ello ha firmado y participado en diferentes actividades internacionales para poder hacerle frente y mitigar sus efectos, a continuación se lista la normativa vigente por el Perú:

-
- Acuerdo de París. Tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, firmado en el año 2015 en la COP21, que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Donde se propone alcanzar el máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo. A fin de limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2, preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales (Organización Naciones Unidas [ONU], 2015).
 - Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como Objetivos Mundiales, se adoptaron por todos los Estados Miembros en el 2015 como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el 2030 (Programa de las Naciones Unidas Para el desarrollo [PNUD], S/F).
 - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). En el año 2002, el Perú fue uno de los países firmantes del Protocolo de Kioto, comprometiéndose a reducir sus emisiones de forma voluntaria para atenuar el cambio climático (Romaní y Arroyo, 2012). Estableciéndose en el Protocolo de Kioto tres mecanismos para facilitar el cumplimiento de la reducción de emisiones siendo estos: 1. Comercio de emisiones entre países desarrollados, incluyendo sus empresas. 2. Mecanismo de Implementación Conjunta. 3. Mecanismo de Desarrollo Limpio.
 - Proyecto de Ley N°6284/2020-CR. Ley de Fomento de Recursos Energéticos Renovables, para el fortalecimiento hídrico y energético de las familias dedicadas a la agricultura familiar, que tiene el objetivo de lograr una sociedad más inclusiva, mejorando la calidad de vida de los pequeños agricultores, fomentando la utilización de recursos energéticos renovables como se establece en los lineamientos de la Ley 30355, Ley de promoción y desarrollo de la agricultura familiar (Congreso de la República, 2020).
 - Política Energética Nacional 2010 - 2040. Tiene como objetivo que el sistema energético debe satisfacer la demanda nacional de energía de manera confiable, regular, continua y eficiente. Esto pasa por contar con una matriz energética diversificada, con énfasis en las fuentes renovables y la eficiencia energética, así como desarrollar un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible” (El Peruano, 2010).
 - D.S. N°075- 2009-PCM. Creación de la Comisión Multisectorial de Bioenergía.
 - D. S. N° 091-2009-EM. Modifica el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles.
 - D.L. N°1002. Ley de Promoción de la inversión de generación de electricidad con el uso de energías renovables (2008). Ley que impulsa la compra de energía proveniente de fuentes renovables en base a subastas. Hasta la actualidad, se han

tenido 4 procesos de subasta durante los años 2010, 2011, 2013 y 2016, que incluyen 49 proyectos de energías renovables (RER), representando 1080 megavatios (MW) y una inversión de US\$ 2138 millones.

- D.S. N° 064-2008-EM. Modifica el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles.

- D.S. N° 016-2008-AG. Declara de interés nacional la instalación de plantaciones de *Jatropha curcas* L (piñón blanco) como alternativa para promover la producción de biocombustibles en la selva.

- Resolución Ministerial N° 165-2008-MEM-DM. Indica las disposiciones relativas a la calidad y métodos de ensayo que permite medir las propiedades de las mezclas de los combustibles diesel BX6 (diesel B2, diesel B5 y diesel B20).

- Directiva N° 004-2007. Contempla los Lineamientos del Programa de Promoción del Uso de Biocombustibles – PROBIOCOM.

- D.S. N° 021-2007-EM. Indica a) cómo se realizará la distribución y comercialización de los biocombustibles ya sea puros o mezclados con combustibles líquidos como las gasolinas y Diesel N° 2, mediante Distribuidores Mayoristas autorizados. b) Exige la calidad que debe cumplir el biocombustible para su comercialización. c) La normativa a seguir para el registro ante la Dirección General de Hidrocarburos de las mezclas de los Biocombustibles con los derivados de los hidrocarburos.

- D.S. N° 013- 2005-EM. Reglamento de la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles, establece los cronogramas de aplicación y los porcentajes de mezcla; así como las normas técnicas de calidad de los biocombustibles; cómo se realizan los registros y las autorizaciones (productores y comercializadores); las zonas para la preparación de la mezcla; la promoción tanto del desarrollo de tecnologías y de los cultivos para biocombustibles. Sin embargo, este reglamento contiene vacíos legales y conceptos los cuales generaban dudas en términos de mezclas, obligatoriedad, cronogramas, definición de autoridades y temas tributarios.

- Ley N° 28054. Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles líquidos aprobada el 2003

- Ley 6953/2002-CR. Ley que incentiva la inversión en recursos energéticos destinados a la generación de energía en el mercado eléctrico peruano.

1.3. Evolución por tipo de uso de las energías renovables en el Perú

Para realizar el análisis se debe partir diferenciando los tipos de uso final, los cuales son: Generación de Electricidad, Generación de Calor y Uso en Fuerza Motriz (Transporte).

a. Generación de Electricidad

Este tipo de uso, pese a la desaceleración de los últimos años, ha tenido un marcado crecimiento en el mercado peruano, con mayor énfasis en el sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN), más que en los sistemas aislados, localizados en su mayoría dentro del ámbito rural.

Sistema Interconectado (SEIN)

Dado el enorme potencial existente en el país, se ha empleado tradicionalmente la generación hidroeléctrica en conjunto con la generación térmica, para el abastecimiento de la demanda eléctrica. Siendo la hidroenergía tan importante en la matriz eléctrica, cuya participación es alrededor del 50 al 60 % de la demanda total de electricidad del SEIN que es abastecida por este tipo de generación (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2018). No obstante, pese al enorme potencial que existe también para otras fuentes como la energía solar, eólica y en menor medida la biomasa y geotermia, estas fuentes no participaban en dicha matriz. Sin embargo, a partir de la aprobación del Decreto Legislativo de Promoción de la Inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables (D.L. N°1002), se estableció que un máximo del 5 % de la demanda de electricidad del SEIN debería ser abastecida mediante energías renovables no convencionales (se excluye a las centrales hidroeléctricas con potencias mayores a los 20 MW).

La implementación de este dispositivo legal, fue mediante procesos de adjudicación llamados subastas, a través del cual el Estado establece cuotas a cubrir con distintas tecnologías renovables no convencionales. Luego, a fin de cubrir estas cuotas, el sector privado presenta sus proyectos, comprometiendo una cierta cantidad de energía de manera anual y a un determinado precio. El Estado por su lado, establece precios máximos por tecnología (a veces queda en secreto y otras es anunciado previo a la subasta). Los proyectos más competitivos (siempre que tengan un precio por debajo del tope que establece el Estado por cada tecnología considerada y mientras la cuota establecida no se haya cubierto) son seleccionados. Cada proyecto adjudicado, tienen preferencia en el despacho y recibe la diferencia entre el costo marginal de electricidad (el cual varía de acuerdo con las centrales que entran a despachar) y la tarifa adjudicada.

A finales del 2020, en el Perú se ejecutaron a través de 4 procesos de subasta, 49 proyectos de energías renovables (RER), que representan 1080 megavatios (MW) y una inversión de US\$ 2 138 millones. Estos proyectos se dividen en 30 centrales hidroeléctricas (373 MW), 7 centrales solares (280 MW), 7 centrales eólicas (394 MW) y 5 centrales de biomasa (33 MW). Asimismo, en diciembre del 2020, entraron en servicio 2 centrales eólicas: CE Huambos y CE Dunas, ambas en Cajamarca, de 18 MW cada una (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería [OSI-NERGMIN], 2018).

La implementación de estos Proyectos se refleja en el Balance Nacional de Energía 2018, donde se muestran las fuentes de energía primaria para la producción de

electricidad, indicando los porcentajes de uso en el mercado eléctrico, uso propio y total (Tabla 1). Siendo la hidroenergía la fuente de energía primaria que es más utilizada para la generación de electricidad, presentando un 84,9% de participación; cuya predominancia es de 91,2% similar en el mercado eléctrico. En la tabla siguiente se muestran las fuentes primarias utilizadas, en unidad de Terajoules para el año en mención (MINEM, 2018).

Tabla 1. Energía primaria para generación de energía eléctrica (Unidad: TJ)

Recurso	Mercado Eléctrico		Uso propio		Total	
	Cantidad	Part.	Cantidad	Part.	Cantidad	Part.
Carbón	419.1	0.3%	4 519.8	30.3%	4 938.9	3.0%
Hidroenergía	134 886.0	91.2%	3 364.9	22.6%	138 251.0	84.9%
Eólico	5 406.1	3.7%		0.0%	5 406.1	3.3%
Solar	2 701.1	1.8%	165.5	1.1%	2 866.5	1.8%
Bagazo	4 023.5	2.7%	6 859.8	46.0%	10 883.3	6.7%
Biogás	483.9	0.3%		0.0%	483.9	0.3%
TOTAL	147 919.71	100.0%	14 910.05	100.0%	162 829.76	100.0%

(Fuente: OSINERGMIN, 2018).

En la figura 1 observamos los porcentajes de participación en el mercado eléctrico de cada recurso, donde la energía proveniente del bagazo y los residuos sólidos urbanos constituyen el 2.7 % y 0.3% respectivamente, sumando un 3% de participación total en el mercado eléctrico nacional. Así mismo, de la tabla anterior, observamos que el Bagazo tiene mayor participación en el uso propio (46%) en comparación con el mercado eléctrico (2.7%). En cuanto al biogás proveniente de residuos urbanos, sólo es usado en el mercado eléctrico (0.3%) y no en el uso propio (0%).

Así mismo, dentro de la política Energética del Perú está contemplada reemplazar el 50% del uso de combustible tradicional por fuentes renovable convencionales dentro del periodos 2010 al 2040, firmando compromisos y en sesión oficial ante la ONU de modificar su "Matriz Energética" actual, (actualmente 27%) (Romero 2012).

Con respecto a la tecnología de biomasa, de los 5 proyectos adjudicados, Espinoza (2020) indica que las centrales termoeléctricas más importantes son 3: Central Termoeléctrica de Biomasa Callao (con dos unidades de generación que brinda una potencia nominal de 1.2 MW c/u), Central Termoeléctrica de Huaycoloro (con 3 unidades de generación diésel que brinda una potencia nominal de 1.6 MW c/u) y la Central de Biomasa Paramonga (con una potencia efectiva instalada de 23 MW).

A continuación, se muestra la relación de Proyectos adjudicados hasta la actualidad, considerando que la última subasta fue en el año 2016. Posteriormente no se ha

realizado otro proceso debido al exceso de oferta existente, originada por la desaceleración de la economía, la cual fue agravada por la pandemia del COVID 19. En la actualidad, dado la crisis, se prevé que la siguiente subasta sea convocada dentro de al menos 5 años.

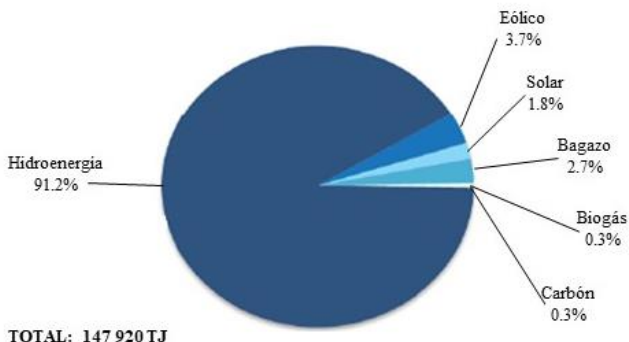


Figura 1. Participación de energías primarias en el mercado eléctrico - Balance Nacional de Energía. (Fuente: MINEM, 2018).

Siendo la primera en el Perú la Central Térmica de Biomasa de Huaycoloro, instalada en el 2007, con un costo de inversión de US\$14 millones, financiado por el Banco Mundial por constituir un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), contando como el aval de las Naciones Unidas y del banco Scotiabank, que permitió la adquisición de los equipos necesarios para la construcción de la planta de generación eléctrica mediante leasing.

Esta central térmica tiene como capacidad instalada de 4400 pies cúbicos/min de captura y quema de gas. Su infraestructura consta de 150 pozos de captación de biogás, un gasoducto (15km) y una estación de succión automatizada y quemado, donde se obtienen 4.8 MWh de energía eléctrica la cual es inyectada al SEIN. Esto es posible por el servicio de tratamiento diario de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Lima, el cual equivale a tres millones y medio de kilos aproximadamente (42% de la generación total de la ciudad de Lima).

Tabla 2. Relación de Postores Adjudicados desde la Primera hasta la Cuarta Subastas RER para el SEIN con Tecnología Biomasa.

Nº de Subasta (año de adjudicación)	Postor	Proyecto	Potencia de la central (MW)	Energía adjudicada (GWh/año)
--	--------	----------	-----------------------------	------------------------------

Primera (2010) Energía requerida (GWh/año): 813 Energía adjudicada (GWh/año): 143 % adjudicado: 18%	Agro Industrial Paramonga S.A.A. Petramas S.A.C.	Central de Cogeneración Paramonga I Huaycoloro	23 4.4	115 28.295
Segunda (2011) Energía requerida (GWh/año): 828 Energía adjudicada (GWh/año): 14.02 % adjudicado: 1.7%	Consortio Energía Limpia	La Gringa V	2	14.02
Cuarta (2016) Energía requerida (GWh/año): 31 Energía adjudicada (GWh/año): 29 % adjudicado: 93.5%	Empresa Concesionaria Energía Limpia S.A.C. Empresa Concesionaria Energía Limpia S.A.C.	C.T. Biomasa Callao CT. Biomasa Huaycoloro II	2 2	14.5 14.5
Total			33.4	186.315

(Fuente: elaborado a partir de las actas de adjudicación de los Procesos de subasta RER para el SEIN de OSINERMING de los años 2010, 2011 y 2016).

Sistemas aislados

Las energías renovables a pequeña escala se han utilizado desde hace varias décadas para proveer energía eléctrica a sistemas aislados. Las tecnologías utilizadas que tienen más antigüedad son las mini y micro centrales hidroeléctricas. Estas centrales, ubicadas principalmente en zonas de la sierra que disponen de caídas de agua, se han utilizado para proveer electricidad a pequeños sistemas y para autoabastecimiento de empresas mineras.

Con el transcurrir de los años, a mediados de la década de los 80, se inició la utilización de los sistemas fotovoltaicos domésticos para electrificación rural de viviendas ubicadas en zonas rurales y de difícil acceso. Estos programas fueron ejecutados principalmente por entidades gubernamentales (tanto gobierno nacional como local) y se instalaron principalmente para viviendas individuales. Típicamente los sistemas estaban constituidos por una batería de plomo, controlador y panel fotovoltaico. La capacidad del panel en los primeros años estaba alrededor de los 35 Wp (Watt pico), para posteriormente irse incrementando hasta cerca de los 180 Wp en las últimas licitaciones.

Así como la tecnología de los sistemas fotovoltaicos se fue masificando, no solo para ser utilizada en proyectos de electrificación rural sino también en sistemas de tele-

comunicación, postas médicas y escuelas rurales; otras tecnologías como los aerogeneradores de baja capacidad en menor medida, también se fueron utilizando.

En los últimos años, otras tecnologías como los sistemas pico fotovoltaicos han incursionado en este campo aplicado a la iluminación de ambientes (aprovechando su modularidad y facilidad para ser transportados de un lugar a otro). Además, los sistemas fotovoltaicos concentrados (baterías - paneles fotovoltaicos) recientemente han tenido mucho impulso, los cuales se provee reemplacen los sistemas tradicionales que consisten en grupos electrógenos a diésel y que se emplean en diversas comunidades ubicadas en zonas aisladas de la amazonia.

Hasta la actualidad, sólo se ha realizado una subasta RER para áreas no conectadas el SEIN, en las zonas norte, centro y sur del país, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Relación de Postores Adjudicados en la Primera Subastas RER en áreas no conectadas el SEIN

Nº de Subasta (año de adjudicación)	Zona	Postor	Remuneración Anual (US\$/Año)
Primera (2010)	Norte	ERGON PERU SAC	11 351 664.00
	Centro	ERGON PERU SAC	8 860 950.00
	Sur	ERGON PERU SAC	8 370 054.00

(Fuente: elaborado a partir del Acta de adjudicación del Primer Proceso de subasta RER para el suministro de energía en áreas no conectadas a Red -Instalaciones RER Autónomas- de OSINERMIN del año 2010)

b. Generación de Calor

Cuando nos referimos a los procesos de generación de calor utilizando energías renovables, básicamente nos centramos en dos procesos. El primero de ellos es la combustión de fuentes de biomasa en estado sólido (residuos urbanos, agrícolas, agroindustriales, forestales y madereros) o gaseoso (biogás). Previo a los procesos de combustión, existen otras etapas de acuerdo con el tipo de residuo. Aquí se pueden mencionar, los procesos de digestión anaeróbica (biogás), los procesos de aglomeración y compactación (briquetas, pellets) y los procesos de descomposición térmica (licuefacción, gasificación).

Estos procesos de combustión generan un fluido a alta temperatura que se puede emplear para transferir su energía (directamente a través de las cocinas a biomasa (tradicionales o mejoradas) y hornos o indirectamente transfiriendo su energía a otro fluido como el agua, el cual se convierte en vapor y se utiliza para entregar calor a diversos equipos para los usos finales). Además, así como se aprovecha el calor para transferir energía térmica, también puede utilizarse para accionar un eje y generar energía electromagnética y con ello producir electricidad. Este es el caso de

las plantas de cogeneración y los grupos electrógenos que funcionan con gas combustible o biogás.

El segundo proceso, en el cual se puede generar calor utilizando fuentes renovables, es aprovechando las propiedades ópticas de los materiales sobre el cual incide la radiación solar. Este es un proceso fototérmico que se utiliza para calentar un fluido (agua en el caso de las termas solares y aire en el caso de secadores solares o colectores). En la actualidad se estima que existen de 65 000 a 70 000 termas solares instalados, mayormente en la ciudad de Arequipa (El Peruano, 2018).

En el Perú, si bien tradicionalmente se emplea la biomasa para procesos de cocción en cocinas tradicionales o mejoradas, existen otras aplicaciones como las plantas de cogeneración que utilizan el bagazo que queda como residuo fibroso (luego de la molienda de la caña de azúcar) y el uso de la torta y los cuescos de la palma aceitera (producción de aceite de palma) para generar tanto electricidad como energía térmica.

No obstante, existen una amplia variedad de residuos de biomasa cuyo uso es marginal por diversas razones que pasamos a explicar. Muchos residuos tienen usos alternativos que generan mayor valor que su empleo como combustible. Por ello, parte de este se destina para otros fines. Como el caso de la fabricación de tableros aglomerados utilizando bagazo, producción de limpiador de vajilla utilizando cascarilla del arroz o empleo de residuos del maíz como alimento del ganado o para la producción de camas de aves y caballos.

Otro aspecto por considerar es que la mayoría de los residuos agrícolas (broza de algodón) se queman para facilitar el proceso de siembra. Esta práctica tiene muchos aspectos negativos, empezando por los socios ambientales, sin embargo, pese a ser una infracción a las normas ambientales, se mantiene en muchas zonas del país.

Entre los residuos que se aprovechan de modo marginal para la producción de energía térmica, podemos mencionar a la cascarilla del arroz, broza de algodón, aserrín, escobajo de la palma aceitera, etc.

Otro punto fundamental, es la tala ilegal destinadas a las plantas carboneras para la producción de carbón vegetal, el cual se emplea como energético a nivel residencial o comercial (principalmente pollerías). Muchas de estas plantas se mantienen dentro de la informalidad, es decir incumpliendo protocolos ambientales por lo que tienen impactos ambientales negativos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011).

c. Uso en Fuerza Motriz (Transporte)

Las energías renovables, en este caso Biomasa, también se utilizan para la producción de biocombustibles, los cuales se comercializan al mercado local en mezcla con combustibles fósiles. Es el caso del etanol anhidro (el cual se mezcla con la gasolina

en un 7.8 % en casi todo el país (exceptuando algunas regiones de la selva) y el caso del biodiesel (se mezcla en 5 %) y se aplica en las mismas zonas que en el caso del etanol anhidro (MINEM, 2005). Así para el 2007 el Decreto Supremo N° 021 – 2007 – EM en su Reglamento para la comercialización de biocombustibles (Título II Artículo 7) establece que en las gasolinas que serán comercializadas a nivel nacional el porcentaje de alcohol carburante debe ser 7,8 % y las mezclas que contengan 92,2% de gasolina y 7,8% de alcohol carburante serán denominadas gasolinas ecológicas según su grado de octanaje.

Además, a partir de la promulgación de la ley de promoción de los biocombustibles y de la puesta en obligatoriedad de su uso (salvo las regiones mencionadas) se atrajeron a diversos inversionistas tanto por el lado de la cadena de la caña de azúcar como de la palma aceitera. Luego, se invirtieron cerca de 500 millones de dólares, en tres plantas (dos son plantas alcoholeras ubicadas en Paita Piura) y la última planta de obtención de biodiesel.

No obstante, si bien se desarrollaron emprendimientos locales con el fin de abastecer la demanda local de biocombustibles que establece la ley, el objetivo estuvo bastante lejos de ser alcanzado, al menos por parte de las empresas nacionales. Por el lado del biodiesel, la planta de Palma del Espino, la cual se construyó con el fin de abastecer el mercado con biodiesel a partir de la palma aceitera, no consiguió su objetivo ya que el biodiesel de palma presentó problemas de congelamiento a temperaturas menores a 0o C y además tuvo que competir en precio con el biodiesel importado de países como Ecuador, Argentina y Estados Unidos, los cuales lo obtienen a partir de la soya. Por este motivo, la cuota requerida por el mercado es cubierta en su mayor parte con biodiesel importado y el resto con biodiesel producido localmente, pero obtenido con semillas de soya importadas.

Además, vale la pena mencionar que el boom de los biocombustibles que se dio en el país luego de aprobada la ley originó una rápida expansión de las áreas dedicadas al cultivo de palma africana (materia prima con mayor potencial para la producción de aceite de palma y con rendimientos de hasta 25 Tn/Ha). Luego de unos años, se pasó de cerca de 20 000 Ha a alrededor de 60 000 Ha y con una proyección de más de 100 000 Ha (FAO, 2011). Sin embargo, en el 2017, la Junta Nacional de palma aceitera del Perú (JUNPALMA) informó que existían 81,000 hectáreas de cultivo de palma aceitera, principalmente ocupando áreas deforestadas por cultivos anteriores, las cuales se encuentran ubicadas en las regiones de San Martín, Loreto y Ucayali. Pero también, en las mismas zonas que los bosques primarios, cuya expansión originó que miles de hectáreas de estos bosques fueron deforestadas, provocando con ello un impacto socio ambiental bastante apreciable (Defensoría del Pueblo [DP], 2017). Esto se confirmó con el Estudio de imágenes satelitales del MAAP # 95 (2018), donde se evaluó los impactos y riesgos de la deforestación provocados por la expansión de palma aceitera en la Amazonía peruana, presentando un Mapa Base donde se destacó las plantaciones que causaron deforestación, principalmente en la zona centro y norte, logrando documentar más de 86,600 Ha de palma aceitera, de

las cuales indica la deforestación directa de, por lo menos, 31,500 Ha (equivalentes a 43.1 mil campos de fútbol).

Para el etanol anhidro, la situación fue distinta. En el caso de las áreas para estos cultivos, se destinaron zonas eriazas ubicadas en Paita (Piura) para el desarrollo de los megaproyectos. Luego, cerca de 9000 Ha de tierras eriazas fueron utilizadas con este fin y con una productividad de alrededor de 140 Tn/Ha (la cual es sumamente alta y refleja el potencial de la zona). Cabe mencionar que, a diferencia de los ingenios azucareros, que en Perú ocupan cerca de 70 000 Ha y se cuenta con 11 ingenios a lo largo de la costa, las plantas alcoholeras, solo producen alcohol a partir de la caña, mientras que en el caso de los ingenios se producen tanto alcohol como azúcar (FAO, 2010). No obstante, los ingenios, al producir alcohol para consumo humano solo requiere alcanzar una concentración cercana al 90 % (por lo tanto, producen alcohol hidratado), mientras que las plantas alcoholeras incorporan una columna de destilación adicional (3 en total en sus procesos) obteniendo una concentración de alrededor del 99.5% por lo cual se le considera alcohol anhidro. Este tipo de alcohol es el que se emplea como carburante en mezcla con la gasolina.

Después de unos años en el cual la cuota del mercado fue efectivamente cubierta con producción local, una de las dos plantas alcoholeras existentes en el país (Maple Etanol), fue transferida a otro grupo comercial y con ello se reestructuró su actividad, mientras que la única planta alcoholera restante, se dedica a destinar cerca del 80% de su producción a la exportación debido a motivos netamente comerciales. En la actualidad, de manera similar al biodiesel, la demanda del mercado de etanol anhidro es cubierta mediante importaciones (MINEM, 2018).

3. Aportes y Reflexiones

-La regulación que se implementó en Perú para promover el desarrollo del mercado de generación de electricidad con energías renovables al sistema interconectado fue efectivo en el caso de algunas tecnologías (fotovoltaica, eólica, mini hidro) pero en el caso de la biomasa, su éxito fue limitado debido a los precios tope que establece el gobierno para cada tecnología y específicamente para la biomasa. Esto refleja que muchos de estos proyectos se presentaron con un precio superior al ofertado (recién fue dado a conocer el día de la subasta) por lo tanto no fueron adjudicados. En consecuencia, hasta la fecha no se ha logrado adjudicar el total de la energía destinada para la generación por biomasa.

-En el caso de la ley de promoción de los biocombustibles, la regulación fue exitosa en atraer inversiones, pero fracasó en contribuir al desarrollo del pequeño agricultor ya que los proyectos que se desarrollaron fueron a partir de grandes inversiones con nula participación del pequeño agricultor, pero sí de la gran empresa, siendo la empresa Palma del Espino exitosa con respecto a la producción de biodiesel, con grandes extensiones de monocultivo de palma aceite en la selva peruana.

Un aspecto relevante es que, en el propósito de contribuir al desarrollo de estas tecnologías para aprovechamiento de la biomasa, la regulación debe incluir instrumentos económicos lo suficientemente claros que permitan hacer competitivas tecnologías que de por sí no lo son. De hecho, si ya lo fueran no necesitarían una regulación que ayude a promoverlas. Esto debe hacerse de una manera muy realista ya que, de no existir, difícilmente se cumplirán los objetivos previstos.

Existen diversas tecnologías que emplean fuentes renovables que todavía no son lo suficientemente competitivas para abastecer la demanda eléctrica del SEIN. Entre ellas se encuentra la geotermia (el Perú dispone de un potencial importante que no es aprovechado porque aún no se han desarrollado los campos geotérmicos a través de pozos exploratorios ni construidas las líneas de transmisión requeridas a fin de conectar la oferta con la demanda). Otras tecnologías como los concentradores solares todavía están en fase de desarrollo. Por el lado de biomasa, las centrales de gasificación y turbinas de gas combinadas tampoco han entrado a competir básicamente debido a los costos.

4. Conclusiones

De la revisión realizada se concluye que:

Los procesos de subasta contribuyeron al despegue de las tecnologías de generación de energías renovables más competitivas (generación minihidráulica, eólica y solar fotovoltaica) y en menor medida, generación con biomasa (residuos de la caña de azúcar y rellenos sanitarios).

Las tecnologías como los sistemas pico fotovoltaicos han incursionado en el campo aplicado a iluminación de ambientes, y los sistemas fotovoltaicos concentrados, están previstos que a futuro reemplazarán a los sistemas tradicionales que se emplean en zonas aisladas de la Amazonía en suministro de energía.

Además del uso de la biomasa en cocinas tradicionales o mejoradas, existen otras aplicaciones, como las plantas de cogeneración que utilizan la biomasa residual fibrosa para generar tanto electricidad como energía térmica.

El boom de los biocombustibles originó una rápida expansión de las áreas dedicadas al cultivo de palma africana, originando que miles de hectáreas de bosques primarios sean deforestadas, provocando con ello un impacto socio ambiental bastante apreciable.

La ley de promoción de los biocombustibles no cumplió los objetivos de fortalecer el sector agrícola local, ya que finalmente derivó en la importación masiva de ambos productos (biodiesel y etanol anhidro) aunque por razones distintas. Además, otras variedades de biocombustibles líquidos para su uso en el transporte como biodiesel de *Jatropha curcas* L, el aceite vegetal combustible o el alcohol hidratado, no tuvieron acogida debido a los costos asociados y a las limitaciones del parque vehicular

existente dada las modificaciones que tenían que realizarse a los vehículos para acoger a estos productos.

Referencias

- BBC Mundo. (7 de junio del 2017) Acuerdo de París: 5 cifras que muestran la magnitud de la contaminación que genera Estados Unidos en el planeta. BBC NEWS. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-40126746>
- Congreso de la República. (2020). Proyecto de Ley N°6284/2020-CR Ley de Fomento de Recursos Energéticos Renovables, para el fortalecimiento hídrico y energético de las familias dedicadas a la agricultura familiar. Congresista Luz Milagros Cayguaray Gambini. Grupo Parlamentario Frente Popular Agrícola FIA del Perú (FREPAPE). Recuperado de: https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/Proyectos_de_Ley_y_de_Resoluciones_Legislativas/PL_06284-20200928.pdf
- Decreto Supremo N° 021-2007-EM, "Reglamento para la comercialización de Biocombustibles", Artículo 7, 2007.
- Defensoría del Pueblo. (2017). Deforestación por cultivos agroindustriales de palma aceitera y cacao: entre la ilegalidad y la ineficacia del Estado. Recuperado de: <https://spda.org.pe/wpfb-file/deforestacion-por-cultivos-agroindustriales-pdf/>
- D.L. N.º 1002. (2008). Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables. Recuperado de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/893170/DL-1002.pdf>
- El Peruano. (2010). Política Energética Nacional del Perú 2010 - 2040 (D.S N°064-2010-EM). Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/eficiencia%20energetica/Normativa/Generales/DS%20064-2010-EM.pdf>
- El Peruano. (2018). El gran potencial de la energía solar. Recuperado de: <https://elperuano.pe/noticia/70012-el-gran-potencial-de-la-energia-solar>
- Espinoza, L. (2020). Energías renovables en Perú: tipos, características y situación actual. Conexión ESAN. Publicado el 18 de diciembre 2020. Recuperado de: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2020/12/energias-renovables-en-peru-tipos-caracteristicas-y-situacion-actual/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2011). El Panorama de la Bioenergía y la Seguridad Alimentaria en el Perú. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i1713s/i1713s02.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2010). El Análisis del BEFS para Perú, Compendio Técnico, Resultados y conclusiones. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i1712s/i1712s00.htm>
- Gálvez, J. (2021). MINEM impulsa proyectos para alcanzar el 15% de la generación eléctrica con RER al 2030 en Perú. Recuperado de: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/minem-impulsa-proyectos-para-alcanzar-el-15-de-la-generacion-electrica-con-rer-al-2030-en-peru>
- IUC (Programa Internacional de Cooperación Urbana). (2018). Gestión de Residuos Sólidos. Recuperado de: https://iuc.eu/fileadmin/user_upload/Regions/iuc_lac/user_upload/ESP_Lima%C3%89xito_De_Mecanismo_De_Desarrollo_Limpio_Mdl_En_El_Relleno_Sanitario_Huayacoloro.pdf

-
- Jaramillo, F.A. (2020). La electrificación rural como tarea pendiente en el Perú. Comentarios a propósito del Nuevo Reglamento de Electrificación Rural aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2020-EM. Taller de Investigación en Derecho Administrativo - TIDA. Recuperado de: <https://tidaunmsm.com/articulos/la-electrificacion-rural-como-tarea-pendiente-en-el-peru->
- Junta Nacional de palma aceitera del Perú. (2017). ¿Qué es la palma aceitera? Conoce el desarrollo palmero en el Perú y el mundo. Recuperado de: <https://junpalmaperu.org/blog/que-es-la-palma-aceitera-perumundo#:~:text=La%20palma%20aceitera%20es%20una,toneladas%20del%20fruto%20al%20a%C3%B1o.>
- Ministerio del Ambiente. (2019). Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal 2019 - Meta 03: Implementación de un Sistema Integrado de Manejo de Residuos Sólidos Municipales. Recuperado de: https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_public/migl/metapas/Presentacion_Residuos_B.pdf
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas). (2018). Balance Nacional de Energía 2018. Recuperado de: http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=610
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas). (2012). Plan nacional de electrificación rural 2013-2022. Lima Perú: Dirección General de Electrificación Recuperado de: http://dger.minem.gob.pe/ArchivosDger/PNER_2013-2022/PNERweb/05/FILE-01.pdf
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas). (2005). D.S. N°013-2005-EM Reglamento de la Ley N° 28054 - Ley de promoción del mercado de biocombustibles. Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/Reglamento%20de%20la%20Ley%20de%20Promocion%20del%20Mercado%20de%20Biocombustibles.pdf
- Monitoring of the Andean Amazon Project. (2018). MAAP #95: Línea base de palma aceitera para la Amazonía peruana. Recuperado de: <https://maaproject.org/2018/palma-aceitera-peru/>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2015). Acuerdo de París. Recuperado de: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). (2021). Actas de adjudicación de los Procesos de subasta RER para el SEIN de OSINERMIN de los años 2010, 2011 y 2016. Recuperado de: <http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/SubastasAnteriores.html>
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). (2020). Boletín Estadístico. Procesamiento, producción y transporte del gas natural. Tercer Trimestre. Recuperado de: <http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/Osinergmin-boletin-estadistico-gas-natural-2020-III.pdf>
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). (2010). Acta de adjudicación del Primer Proceso de subasta RER para el suministro de energía en áreas no conectadas a Red (Instalaciones RER Autónomas) de
-

-
- OSINERMIN del año 2010. Recuperado de:
<http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/Documentos/1SubastaOffGrid/Actas/Acta%20de%20Adjudicacion%20Buena%20Pro.pdf>
- OSINERMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). (2018). Energías Renovables: Experiencia y Perspectivas en la ruta del Perú hacia la Transición energética. Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. (S/F). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Romero, C. (2012). Política nacional de bioenergía, avances y retos. Recuperado de: https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/foro-seg-alimentaria/bio_expo_senasa.pdf
- Vásquez, A.L., Tamayo, J.F.R. y Jácome, J.S. (Ed.). (2017). La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático, Lima, Perú: Editorial Gráfica Biblios S.A.

SECCIÓN IV:

**MODELOS DE GESTIÓN,
POLÍTICAS Y ESQUEMAS DE
FINANCIAMIENTO**

IV. MODELOS DE GESTIÓN, POLÍTICAS Y ESQUEMAS DE FINANCIAMIENTO

Santiago Garrido¹ y Silvana Manrique²

¹ IESCT-UNQ-CICBA, CONICET, Bernal, Provincia de Buenos Aires, CP1876, Argentina

² Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439.

Introducción a la Sección IV

El aprovechamiento energético de la biomasa en sus diferentes formas se viene consolidando como una de las alternativas para avanzar en procesos de transición energética a nivel global. En el caso de Iberoamérica, esta relevancia se acrecienta en países en los que las producciones agropecuaria y forestal son una de las principales actividades económicas.

En muchos países se viene impulsando la bioenergía como parte de programas de bioeconomía y de economía circular que buscan desarrollar cadenas de valor que permitan diversificar la producción agroindustrial. Entre las principales potencialidades que se le asigna a este tipo de fuente de energía, se destaca su disponibilidad a escala local a pesar de las particularidades biofísicas de cada territorio. Asimismo, se destaca que la biomasa puede tener diferentes niveles de aprovechamiento, desde el autoconsumo de energía en pequeña escala hasta la producción en gran escala; versatilidad que le confiere el hecho de incluir una gran variedad de materias primas orgánicas.

Esta diversidad de opciones que presenta la bioenergía hace que los modelos de gestión, las políticas y los esquemas de financiamiento que se aplican sean igual de diversos. Los estudios de caso que se analizan en el presente libro son un claro ejemplo de estas múltiples conjugaciones. Los mismos expresan variadas estrategias y alternativas para responder a una serie de problemas productivos, energéticos, ambientales y sociales. A continuación destacamos el análisis transversal de los aspectos mencionados.

Reflexiones transversales a los capítulos de este Libro

De los modelos de gestión

Un rasgo significativo que se puede observar en todos los casos presentados es que, en su gran mayoría, son iniciativas impulsadas por grupos de investigación universitarios o de instituciones científicas en forma de proyectos piloto, experimentales o demostrativos. Otra parte, también impulsados desde la academia son estudios prospectivos o de evaluación de potencial.

Si tomamos como referencia el universo de casos presentados en el libro (obviamente que es una muestra por demás incompleta), podemos observar que a pesar de haberse instalado como alternativa energética, la bioenergía y las múltiples opciones de aprovechamiento de la biomasa siguen siendo limitadas. La búsqueda de opciones e innovaciones sigue estando restringida al sector científico-tecnológico. Esto no quita, sin embargo, que no haya interés del sector productivo privado o del sector gubernamental. Se destacan diferentes proyectos en clave de vinculación y transferencia, como también el asesoramiento técnico para la elaboración e implementación de políticas públicas.

Los casos que se presentan en el libro se concentran en su mayoría en el sector agrícola (casos XI y XV), forestal (casos II, IV, V, VI, VII, XIII y XIV) y el ganadero (Casos III, XVIII y XIX). Estos casos se pueden considerar como los sectores en los que tradicionalmente se pueden encontrar aprovechamientos bioenergéticos sobre todo a partir de sus residuos. Sin embargo, se desatacan otros casos que se enfocan el potencial uso en actividades productivas que no son las habituales como el aprovechamiento de los residuos de pesca (caso IX) y de la producción industrial de alimentos/bebidas alcohólicas (casos I y XVI).

Además de las actividades productivas, se pudieron observar estudios que se concentran en generar opciones para proteger la biodiversidad y los bosques nativos promoviendo un manejo sostenible de los recursos biomásicos. En la misma línea se destacan los casos que proponen el aprovechamiento de especies exóticas e invasoras (Casos II, VIII y XIII), y los casos que abordan el aprovechamiento de residuos de poda urbana para diferentes usos térmicos (Casos X y XII).

Como la mayoría de los casos se centran en proyectos de investigación, evaluación de potencial o experiencias piloto, se hace muy difícil poder identificar aspectos que

definan modelos de gestión definidos. A pesar de ello, se pueden identificar dos modelos a grandes rasgos:

1) Propuestas de gestión local como estrategia para generar sistemas de calefacción basados en el uso de recursos biomásicos en sistemas centralizados (casos XVII, XVIII y XIX) o distribuido a nivel domiciliario (casos XII y XIV).

2) Propuestas de aprovechamiento energético de residuos en procesos productivos industriales y agropecuarios (casos I, IX, XI, XV, XVI y XIX)

El resto de los casos, que se centran en la evaluación de potencial o de tecnologías concretas, pueden ajustarse a algunos de estos modelos o promover algún otro dentro de múltiples combinaciones posibles en términos de obtención del recurso, procesamiento y aprovechamiento energético.

De las Políticas

Muchos de los casos que se presentan en este libro se ajustan y hacen referencia a los marcos de referencia que ofrecen la legislación vigente en cada país o a escala local. En especial, se destaca la mención de políticas de promoción para el desarrollo y aprovechamiento de energías renovables (y en particular la de biomasa) (Casos IX, XIX y XX), normativas ambientales que buscan reducir el impacto negativo de ciertas actividades productivas (casos XIII y XVI), o normativas para promover el manejo sustentable de residuos en clave de economía circular o estudios de ciclo de vida (casos VI, VII y IX).

Cabe destacar que una de las ventajas del uso de la biomasa es que está intrínsecamente ligada a las configuraciones territoriales y por tanto, se vincula con múltiples aspectos del territorio: salud poblacional y saneamiento ambiental; oportunidades de negocio y activación de economías local; fortalecimiento de vínculos interactorales e intersectoriales y promoción de alianzas para la gestión del recurso; recuperación de cualidades o características en suelo o agua (fitoremediación, biocarbón, reducción de carga orgánica, entre muchos otros); y muchas otras dimensiones que emergen en cada territorio. Por ello, las normativas y políticas existentes deben analizarse desde estas perspectivas que se entrecruzan y conjugan en cada proyecto específico. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, son más claras las políticas vinculadas a la generación de bioelectricidad (posiblemente porque involucran escalas interesantes), que aquellas vinculadas a los aprovechamientos térmicos en cada uno de los países de la región (en las cuales nos enfocamos más como Red).

Es por esto que los aportes realizados en la diversidad de situaciones visibilizadas en este libro, pueden ser útiles como insumos para generar nuevas políticas y marcos regulatorios.

Además de las políticas energéticas y ambientales, se observan mucho la influencia de políticas para la promoción en ciencia y tecnología a través de organismos técnicos y financiadores (casos II, VI, VII, VIII, XI, XIII, XIV, XV, XIX). Obviamente, que este sesgo no es extraño, es lo normal y esperable. Sin embargo, es importante

llamar la atención sobre otro tipo de políticas que tienen menos visibilidad y que pueden ser relevantes para la consolidación de la bioenergía como alternativa. Incluso, algunas resultan claves para repensar algunos de los casos propuestos. Se pueden observar en menor medida la influencia de políticas industriales o de desarrollo productivo en general (caso XIV y XVI), agropecuarias (casos XIV y XV) o de desarrollo social (caso XII).

Fuentes de financiamiento

Dado que la mayoría de los casos se concentran en proyectos de investigación científica, el financiamiento principal se concentra en fondos de organismos públicos de CyT. Sin embargo, en la misma línea de lo que se menciona en el apartado sobre políticas, se pueden identificar proyectos financiados con fondos de otras áreas de gobierno (energía, agricultura o desarrollo social).

Por fuera de los financiamientos públicos se pueden observar algunos proyectos que recibieron financiamiento asociados a cooperación internacional (casos XVIII y XIX) y en menor medida con aportes de organizaciones no gubernamentales (casos XII y XVII).

Muchos de los casos presentados en este libro pueden clasificarse como proyectos de cooperación público-privados entre el sector productivo y el científico-tecnológico. No queda claro si en las diversas experiencias, los actores privados participan con el aporte de recursos económicos (una excepción sería uno de los ejemplos analizados en el caso XIX que corresponde a un proyecto privado); ya que en la mayoría de los casos con participación privada, la misma se centra en el aporte de información o puesta a disposición de instalaciones y equipamientos (casos IX, X, XVI y XIX).

Otra particularidad que se puede observar es la intervención de gobiernos locales y regionales con diferentes tipos de aportes materiales (casos IX, X, XII, XVII y XVIII). Estos aportes se orientan, en algunos casos, a desarrollar capacidades en el sector productivo local y, en otros, a promover experiencias comunitarias de aprovechamiento bioenergético.

Aún con este tipo de aclaraciones, en los casos presentados no se registran mecanismos de financiamiento específico para el desarrollo de proyectos de bioenergía por fuera de los asociados a la investigación científica. Incluso, las políticas públicas para promoción de energías renovables que se mencionan, no incluyen mecanismos de financiamiento específicos.

Comentarios finales

Para un adecuado diseño de políticas públicas e instrumentos de fomento y promoción, resulta necesario el reconocimiento y la clara identificación de algunas cuestiones netamente vinculadas con la bioenergía:

-
- La biomasa no es un recurso, sino un conjunto de recursos. Para su adecuada promoción, las diferentes categorías incluidas en este concepto deben ser consideradas por separado. Entre ellas se cuentan: recursos vegetales diversos, residuos agrícolas, forestales, pecuarios, sólidos urbanos, residuos agro o foresto-industriales, efluentes cloacales o industriales, etc. No entran en este concepto los recursos orgánicos que han sido incluidos en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización, como los combustibles fósiles.
 - La disponibilidad del recurso de biomasa seleccionado definirá la escala posible de aprovechamiento, lo cual tiene que ver con la frecuencia de generación, época de generación, productividad y porcentaje aprovechable, requerimientos de espacio de acopio, requerimientos de acondicionamiento previo a su conversión energética, finalidad o aplicación a la que se destinará. Las medidas de promoción deben ser adecuadas, por tanto, para las diferentes escalas de aprovechamiento.
 - El tipo de aplicación. Como ya se ha mencionado y se ha ejemplificado en este libro, los recursos de biomasa pueden ser aprovechados con múltiples finalidades. De allí, la necesidad de conformar reglamentaciones específicas que involucren no solo la etapa de conversión energética, sino también aquella que involucra los diferentes procesos de acopio, acondicionamiento y logística de manejo de los recursos.
 - La multidimensionalidad de los proyectos de biomasa. Claramente, los proyectos de bioenergía deben ser planificados contemplando las múltiples dimensiones del territorio que involucra, incluyendo los actores vinculados.

Por último, a futuro se vislumbra un escenario complejo que deberá conjugar una demanda incremental de alimentos, fibras vegetales y energía para una población en crecimiento, y en un planeta finito. Por tanto, el uso eficiente de los recursos, en esquemas circulares y de múltiples usos, será prioritario para asegurar el sostenimiento de los ecosistemas a largo plazo. Todo ello, en el marco de la necesaria discusión y reflexiones éticas sobre las vinculaciones sociedad-naturaleza y los modelos actuales de producción y consumo.

SECCION V:

**APORTES PARA EL MALETÍN DE
BUENAS PRÁCTICAS EN
BIOMASA Y BIOENERGIA**



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Sección V, 2021: 434-436
ISBN: 978-84-15413-40-0

V. APORTES PARA EL MALETÍN DE BUENAS PRÁCTICAS EN BIOMASA Y BIOENERGÍA

Silvina M Manrique^{1*}, María Luisa Ojeda², José María Sánchez Hervás³, Alfredo Curbelo Alonso⁴ y Santiago Garrido⁵

¹*Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439.*

²*Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile*

³*Unidad de Valorización Termoquímica Sostenible, CIEMAT, 28040, Madrid, España.*

⁴*Grupo Bioenergía. CUBAENERGÍA. Cuba.*

⁵*IESCT-UNQ-CICBA, CONICET, Bernal, Provincia de Buenos Aires, CP1876, Argentina*

5.1. Consideraciones finales

Al comienzo de nuestra actividad como Red, nos propusimos la construcción de un Maletín de Buenas Prácticas (MBP). Implicando en esto, la identificación de los aportes tecnológicos de producto, proceso y organización que podrían constituir, en su difusión y réplica, motores de promoción de sistemas de bioenergía sustentables en Iberoamérica.

Nuestro MBP ya tiene una gran cantidad de materiales que están puestos a disposición a partir de nuestros canales de comunicación. Este libro forma parte de este gran esfuerzo conjunto. En éste, hemos identificado veinte casos ejemplares de proyectos de biomasa y bioenergía en la Región Iberoamericana. No se trata de casos perfectos (ni de los únicos), sino de experiencias que han logrado un aprendizaje en su diseño, implementación o ejecución, en algunos de los pilares temáticos en los que trabajamos.

En la primera sección de este libro se han compartido diferentes métodos de estimación del potencial de los recursos y su bioenergía, que solo brindan una mirada de aproximación, ya que claramente el estudio de cada tipo de recurso de biomasa, requiere una técnica específica. Sin embargo, se proporcionan las bases generales para poder adecuar las herramientas al tipo de recurso a estudiar. En todos los casos, la aplicación de alguno de estos métodos resulta fundamental para definir sistemas de bioenergía adaptados a las cualidades y potencialidades de cada territorio. Desde la construcción de sencillos factores que involucran etapas de campo y laboratorio, la formulación de modelos y herramientas de cálculo y soporte, hasta la complejización dentro de sistemas de información geográfica que permite el entrecruzamiento de datos geospaciales que pueden reflejar aspectos sociales, naturales, económicos y otros.

En la segunda sección se presenta una ejemplificación teórica y práctica de métodos que posibilitan considerar la cadena de bioenergía y sus posibles impactos (positivos y negativos) a lo largo de cada uno de sus eslabones como es el ACV, pero que puede realizarse a partir de mediciones concretas en experiencias piloto. Se incluyen también alternativas de uso de la biomasa que pueden resultar complementarias a los usos energéticos y brindar por tanto soluciones territoriales mixtas. Asimismo, más allá del aporte técnico y metodológico concreto que se brinda en esta sección, se pone de relieve la necesidad de considerar que la biomasa está íntimamente asociada con los territorios y sus comunidades, y por tanto, los enfoques sobre su aprovechamiento deben ser holísticos y sistémicos.

En la tercera sección se presentan casos de aplicación de procesos y tecnologías de adecuación del recurso (pelletización, torrefacción) y conversión energética (combustión, gasificación, pirólisis, cogeneración, redes de calor, y digestión anaerobia), para obtener energía térmica, eléctrica o ambas, en diferentes escalas y sectores de aplicación. Es interesante el panorama relevado en los estudios de caso, ya que permite observar la adecuación de las tecnologías a las diferentes realidades de cada país y su implantación en emplazamientos concretos. El último capítulo de la sección anterior, abre el camino para la última sección, ya que se revisa el caso de Perú, como análisis genérico de las políticas y marcos normativos en relación a las fuentes de energía renovable y en particular de la bioenergía.

Por último, en la cuarta sección, se revisan esquemáticamente en un eje transversal, las políticas, esquemas institucionales y marcos regulatorios operantes en cada región y país, que son una parte coyuntural que debe contemplarse para la promoción de los sistemas de bioenergía. Esquemas asociativos, modelos de gestión, vínculos y lazos dentro del territorio y fuera de él, son ejemplificados como vías posibles de organización de los proyectos, promoción del comercio local o captación de fondos y financiamiento para que los mismos puedan ejecutarse exitosamente. Aun el desafío es mayor, dejando una mirada a los mecanismos de apropiación que deberían contemplarse en relación a factores culturales y sociales, a fin de asegurar no solo la aceptación sino la perdurabilidad sostenible en el tiempo.

Claramente los aprendizajes logrados en cada Estudio de Caso que se comparten en este Libro, resultarán herramientas valiosas para contribuir a la reducción de la brecha hacia un escenario de mayor sustentabilidad energética territorial.

5.2. Mirada al futuro

Nuestro trabajo se enfoca en promover soluciones acordes para las necesidades de la Región y que contribuya a la creación de oportunidades en aquellas zonas más desfavorecidas. Para ello, se consideran todos los eslabones involucrados en las cadenas de valor de la biomasa, desde un enfoque sistémico, capitalizando las fortalezas que aportan cada uno de los grupos de la Red.

Los Estudios de Caso que se comparten en este libro, además de las herramientas brindadas, muestran claramente un marco de oportunidad a futuro, vinculado no solo con la diversidad de recursos de biomasa existentes en los territorios, sino con las múltiples alternativas de aplicación, y la posibilidad de la biomasa de dar respuestas concretas en distintas realidades complejas. Se pone de manifiesto, asimismo, la creatividad de las comunidades iberoamericanas para gestionar sus recursos de manera eficiente generando movimientos sinérgicos que pueden activar las economías locales y dar respuestas socio-económicas y ambientales a su gente.

El estímulo económico para la reactivación post pandemia es una oportunidad para integrar aspectos de sostenibilidad a largo plazo incluyendo criterios de descarbonización y resiliencia, generando puestos de trabajo y beneficios económicos y sociales, y garantizando la construcción de un futuro más inclusivo.

En este contexto, con gran satisfacción aportamos este Libro a nuestro Maletín de Buenas Prácticas, que refleja el compromiso desinteresado de los grupos que conforman la Red ReBiBIR (T) -y los múltiples actores y sectores con los que se vinculan-, para compartir sus iniciativas, innovaciones, avances y experiencias, en la búsqueda de que resulten catalizadores de cambios y proyectos sustentables para un mayor bienestar futuro de la Región Iberoamericana.

EQUIPO EDITORIAL

EQUIPO EDITORIAL

Comité Académico y Científico

Coordinación General: Dra Silvina M. Manrique

Comité Académico y Científico:

- Dra Silvina M. Manrique (Argentina)
- MSc. María Luisa Ojeda Almonacid (Chile)
- Dr José María Sánchez Hervás (España)
- Dr Alfredo Curbelo Alonso (Cuba)
- Dr Santiago Garrido (Argentina)

Autores (por orden alfabético)

Agresott, Jessica A.	Maestre, Alfonso
Águila, Isabel	Manrique, Silvina M
Álvarez, Juan Pablo	Martínez Bravo, René
Arteaga Pérez, Luis E	Martínez Pulido, Guillermo
Bahamonde, Valeria	Mateus, Celso Libardo
Bahillo, Alberto	Mendoza Fandiño, Jorge
Bula Silvera, Antonio	Molina, Gregorio
Cabello Torres, Rita	Moreno, Juan Carlos
Carranza, María,	Natan, Pamela
Carreras, Rocío	Neyra Vargas, Pierina
Casas Ledón, Yannay	Nogar, Ada Graciela
Césare Coral, Mary Flor	Nuño, Gabriela
Chen B., Jorge M	Ojeda, María Luisa
Collahuaso, Edwin	Ortega, Maray
Contreras, María Luisa	Ortega, Maria De Los A.
Deago, Euclides	Ortiz, Isabel
Diéguez Santana, Karel	Otero, Juan
Durán, Diana M	Peralta, Florencia
Flores, Mauricio	Perdiguero Samaja, Yamile

Gallardo, Pedro	Pérez, Amaury
Gallardo, María Rosa	Quintero Bertel, Quelbis,
García Bustamante, Henry	Rearte, Martín
Garrido, Santiago	Rebollo, Iván
Gómez Vásquez, Rafael	Rincón, José M
Guevara, Pedro O	Risso, Marcos
Gulotta, Marta	Sánchez Rodríguez, Janitzi
Heredia González, Daniel	Sánchez, José María
Honorato, Martin O	Sotelo Méndez, Alejandrina
Iman Torres, Isabel	Tauro, Raúl Jesús
James, Arthur	Ugarte Alván, Carlos
Jiménez, Vanesa	Valencia Albitres, Christian
Kulbaba, Pablo	Vega, Mabel
Kurt, Zohre	Verdeza Villalobos, Arnaldo
Lenis Rodas, Yuhan	Vidal Gutiérrez, Humberto
Ludueña, Myriam	Villalba Jiménez, Hernando

Equipo de Revisión Editorial

Responsable: Beatriz Balderrama

Colaboradora: Aien Weni Salvo

Sobre los grupos participantes

Los siguientes grupos, organizaciones e instituciones forman parte de la Red, mencionadas en orden alfabético de países, y han contribuido activamente en la elaboración de este Libro:

ARGENTINA. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Universidad Nacional de Salta (UNSa). Salta.

ARGENTINA. Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes (IESCT- UNQ). Buenos Aires.

-
- ARGENTINA. Centro de Estudios Sociales de América Latina (CESAL) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN). Buenos Aires.
- ARGENTINA. Departamento de Energías Renovables. Instituto Nacional De Tecnología Industrial (INTI). Tucumán.
- BRASIL. Núcleo de Excelencia en Generación Térmica y Distribuida (NEST), Instituto de Ingeniería Mecánica-IEM, Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá.
- CHILE. Centro de Estudios de Recursos Energéticos (CERE). Universidad de Magallanes, Magallanes (UMAG).
- CHILE. Laboratorio de Procesos Térmicos y Catalíticos. Universidad del Bío-Bío y Universidad de Concepción. Concepción.
- COLOMBIA. Grupo de Investigación Bioindustrias. Universidad de Sucre, Sucre.
- COLOMBIA. Centro de Desarrollo Industrial TECSOL Ltda (CDI-TC). Bogotá.
- CUBA. Centro de Gestión de la Información y el Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA). Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA) y Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). La Habana.
- ECUADOR. Gestión y Conservación Ambiental (GCA) de la Universidad Estatal Amazónica (UEA).
- ESPAÑA. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnologías (CIEMAT). Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Madrid.
- MÉXICO. Laboratorio de Bioenergía – Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES)- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Morelia.
- PANAMÁ. Grupo de Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI)- Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).
- PARAGUAY. Centro de Tecnología Apropriada (CTA). Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Paraguay.
- PERÚ. Laboratorio de Energías Renovables (LER). Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación ha sido financiada por el Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), que hace posible este valioso trabajo conjunto regional.

Un reconocimiento de especial gratitud a los Editores Académicos, responsables de la conducción y compaginación de cada una de las secciones del libro, por su valioso tiempo, su generoso compromiso y sus propuestas, ideas y sugerencias, sin las cuales este Libro no hubiera alcanzado la calidad que hoy puede ofrecer. Gracias por las jornadas de trabajo en calidez, entusiasmo, respeto y compañerismo.

De manera extensiva, gracias a todos los socios de la Red ya que en nuestras mesas de trabajo y reuniones de Coordinación, surgió el germen que hoy se va consolidando poco a poco en las publicaciones y actividades que llevamos adelante.

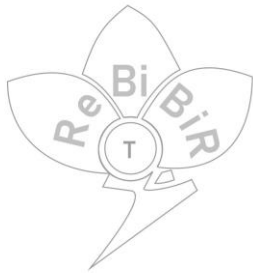
Se agradece asimismo la participación de los Revisores, Tutores y Evaluadores de capítulos, que aportaron a la excelencia de los mismos en un esfuerzo desinteresado.

Toda la gratitud a cada uno de los Socios de la Red que enriquecieron con sus valiosas experiencias y comentarios esta publicación, y la hicieron posible con el compromiso de sus generosos aportes. Y en ellos, agradecemos a cada una de las Instituciones, Organizaciones y entidades mencionadas como participantes de esta publicación.

Asimismo, gracias a los socios de la Comunidad Virtual de ReBiBiR (T) que se sumaron en nuestra convocatoria para incluir otras voces regionales.

Al Equipo de Revisión Editorial, por el tiempo y dedicación minuciosa, invertidos en la búsqueda de un material de la mayor calidad posible.

Asimismo, se reconoce a cada uno de los asistentes y participantes de los eventos ofrecidos por ReBiBiR (T) durante el año 2020, que se sumaron con entusiasmo a los debates, formación e intercambios y nos incentivaron a compartir estas 20 experiencias prácticas que hoy acercamos; y a partir de las cuales buscamos la promoción de la planificación, desarrollo y ejecución de sistemas de biomasa y bioenergía que aporten a la sustentabilidad territorial.



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural

Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T)

Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED)

Web oficial: <http://www.cytcd.org/es/rebibir>

Blog: <https://redrebibir.wordpress.com/>

Youtube: "red rebibir"

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/red-rebibir/>

Facebook: <https://www.facebook.com/red.rebibir.9>

Twitter: @rebibir

Descargo de responsabilidad: Las opiniones, conceptos, resultados, tablas, gráficas, ilustraciones y fotografías, que hacen parte de cada uno de los capítulos, son responsabilidad exclusiva de los autores mencionados en los mismos.