



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



BIOECONOMÍA SUSTENTABLE Y CIRCULAR RUMBO AL DESARROLLO SOSTENIBLE:

Potencialidad de la biomasa y la bioenergía en Iberoamérica



CUADERNO DE TRABAJOS

AÑO 2023

BIOECONOMÍA SUSTENTABLE Y CIRCULAR

RUMBO AL DESARROLLO SOSTENIBLE:

Potencialidad de la biomasa y la bioenergía en Iberoamérica



CUADERNO DE TRABAJOS



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



BIOECONOMÍA SUSTENTABLE Y CIRCULAR RUMBO AL DESARROLLO SOSTENIBLE: Potencialidad de la biomasa y la bioenergía en Iberoamérica

Cuaderno de Trabajos

Editores:

Silvina M. Manrique

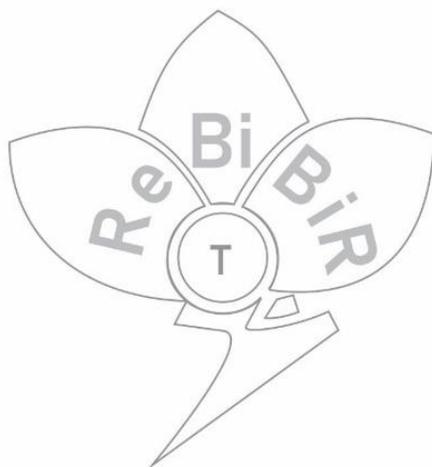
Quelbis Quintero Bertel

Claudia Gutiérrez Antonio

ISBN: 978 84 15413 55 4

AÑO 2023





© Manrique S.M., Quintero Bertel Q. y Gutiérrez Antonio C (Editores). Bioeconomía sustentable y circular rumbo al desarrollo sostenible. Potencialidad de la biomasa y la bioenergía en Iberoamérica. Serie EIBB-2022 (Vol II): Cuaderno de trabajos. 260 páginas. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). Editorial: Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Madrid, España.

ISBN: 978 84 15413 55 4



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



Dedicado a nuestra preciosa Comunidad Iberoamericana



Prólogo

[ReBiBiR \(T\)](#) es la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural, conformada por más de dos centenares de socios donde se encuentran representadas universidades, centros de investigación, entidades de la administración pública y empresas, provenientes de diferentes países de Iberoamérica, 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.

Como parte de las actividades que lleva adelante la Red, se ha convocado a la presentación de trabajos inéditos, que fueron compartidos durante un triple evento:

- el Congreso-Taller Internacional en Biomasa y Bioenergía
- el Coloquio Internacional de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ (México) y
- la Reunión de Trabajo de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T),

Estos eventos se desarrollaron durante los días 16 al 18 de noviembre del 2022, en el Parque Biotecnológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México, a la cual se agradece profundamente su disposición para actuar como anfitriona en esta oportunidad.

El Cuaderno de Trabajos que hoy se comparte es sólo una pequeña muestra de las grandes capacidades regionales, y la expresión de un admirable bagaje de conocimientos, experiencias e ingenio, volcadas en innovadoras propuestas para la promoción de una bioeconomía sustentable y circular para el desarrollo armonioso de la Región.

Los animamos a seguir trabajando en pos de ese futuro que anhelamos.

Los Editores

Contenido

Prólogo.....	6
Torrefacción de residuos de cosecha de algodón del campus de la UNALM	8
Optimización y evaluación de variables en la producción de biogás escala de laboratorio. Desarrollo de un caudalímetro hidráulico.....	22
Propiedades mecánicas de materiales compuestos basados en yeso y jacinto de agua	34
Utilización de residuos de poda de árboles para la producción de briquetas	43
Efecto de la disponibilidad de agua sobre la producción de biogás de híbridos de sorgo de madurez contrastante	53
Aprovechamiento de residuos de la cría de insectos (frass) como fertilizante: aplicación y beneficios.....	67
Desarrollo de una estufa a pellet con alimentación mecánica y controlador adaptativo de la combustión para biomásas no convencionales de Argentina	87
Análisis Exergético y Económico para el diseño de procesos – Caso de estudio planta de pirólisis de residuos agroindustriales	104
Gasificación Autotérmica a Escala Banco a Partir de Biomasa Residual Proveniente de Rastrojo de Sorgo	119
Evaluación Energética, Exergética y Económica (3E) en planta de incineración directa de residuos urbanos con generación eléctrica.....	136
Los potenciales bioenergéticos en Brasil	161
Dendroenergía y volatilidad macroeconómica. Viabilidad de cultivos dendroenergéticos en Argentina	171
Una revisión sobre las tecnologías de revalorización de residuos vitivinícolas	187
Políticas energéticas en Argentina. Aportes para la ejecución de proyectos de biogás....	202
Cuantificación del recurso biomásico derivado de la poda del olivo en dos provincias productoras de la Argentina.....	218
Efecto de zeolita natural sobre la producción de metano a partir de estiércol porcino ...	233
Escenarios de revalorización energética de residuos agrícolas	245
Palabras finales.....	258
Sobre el Equipo Editor	259



Torrefacción de residuos de cosecha de algodón del campus de la UNALM

Roasting of cotton crop waste from the UNALM campus

Angela Tiffany Castillo Híjar,

Facultad de Ingeniería Agrícola - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima- Perú.

atcastilloh@lamolina.edu.pe,

<https://orcid.org/0000-0003-1555-0948>

Mary Flor Césare Coral,

Facultad de Ciencias - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima- Perú

mcesare@lamolina.edu.pe,

<https://orcid.org/0000-0002-6901-3171>

Ana María Arellano Valz,

Facultad de Ciencias - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima- Perú

aarellano@lamolina.edu.pe,

<https://orcid.org/0000-0002-3534-8125>

José Luis Calle Maravi,

Facultad de Ingeniería Agrícola - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima- Perú.

jalles@lamolina.edu.pe,

<https://orcid.org/0000-0002-0765-9727>

Resumen

En el Perú la especie de algodón más distribuida es el *Gossypium barbadense*, también conocida por el nombre de sus dos variedades más famosas como algodón de Pima y algodón Tangüis. Por sus características tiene alta demanda mundial, y su producción genera gran cantidad de biomasa residual, que es abandonada en el campo. Por ello, se realizó la torrefacción de los residuos (broza y tallo) de este cultivo a distintas temperaturas (200°C, 250°C y 300°C) con la finalidad de darle un valor energético. La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Objetivo: Calificar al proceso de torrefacción más promisorio para la obtención de combustibles sólidos. Metodología: Se usó la torrefacción en una atmósfera inerte generada con nitrógeno, con una razón de calentamiento de 10°C/min y un tiempo de residencia de 30 minutos. Posteriormente, las muestras (sin tratar y torrefactada) se caracterizaron con los siguientes análisis: proximal (ASTM D7582) usando el equipo Termogravimétrico TGA701, análisis elemental (ASTM D5373) usando los equipos analizadores elementales CHONS628 y finalmente, el contenido energético para la determinación del poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) con el calorímetro AC600 mediante la norma ASTM D5865. Resultados: Se observa un leve aumento del PCS de la muestra de la broza al ser sometida a la torrefacción a 250°C, este aumento es paralelo a una gran pérdida de masa, causada por la descomposición de la hemicelulosa estructural de la muestra. Sin embargo, a 300°C se observa que disminuye el PCS levemente. Conclusiones: La broza de algodón no es una biomasa prometedora para ser y obtener un combustible sólido con mejores características cuando se le aplica procesos de torrefacción a temperaturas mayores de 250°C. Por otro lado, en las muestras de tallo torrefactas, el contenido energético disminuye a temperaturas mayores de 200°C.

Palabras Clave:

biomasa de algodón, combustibles sólidos, poder calórico superior, rendimiento, torrefacción.



Abstract

In Peru the most distributed cotton species is *Gossypium barbadense*, also known by the name of its two most famous varieties as Pima cotton and Tangüis cotton. Due to its characteristics, it has high global demand, and its production generates a large amount of residual biomass, which is abandoned in the field. Therefore, the roasting of the residues (brush and stem) of this crop was carried out at different temperatures (200°C, 250°C and 300°C) in order to give it an energy value. The research was developed in the Renewable Energy Laboratory (LER), of the National Agrarian University La Molina, Peru. Objective: To qualify the most promising torrefaction process for obtaining solid fuels. Methodology: Torrefaction was used in an inert atmosphere generated with nitrogen, with a heating rate of 10°C/min and a residence time of 30 minutes. Subsequently, the samples (untreated and roasted) were characterized with the following analyses: proximal (ASTM D7582) using the TGA701 thermogravimetric equipment, elemental analysis (ASTM D5373) using the CHONS628 elemental analyzer equipment and finally, the energy content for the determination of the upper calorific value (PCS) and inferior (PCI) with the AC600 calorimeter using the ASTM D5865 standard. Results: There is a slight increase in the PCS of the brush sample when subjected to roasting at 250 ° C, this increase is parallel to a large loss of mass, caused by the decomposition of the structural hemicellulose of the sample. However, at 300°C it is observed that PCS decreases slightly. Conclusions: Cotton brush is not a promising biomass to be and obtain a solid fuel with better characteristics when roasting processes are applied at temperatures above 250 ° C. On the other hand, in roasted stem samples, the energy content decreases at temperatures above 200°C.

Keywords:

cotton biomass, solid fuels, Higher heat value, yield, roasting.

Introducción

El Informe de junio del 2022 [1] indica que el acceso a la energía en los últimos años se ha visto limitado por la pandemia de COVID-19 y la guerra en Ucrania, lo que viene causando problemas de abastecimiento en los países dependientes de combustible fósil extranjero

por tener una capacidad limitada para cubrir los incrementos en los costos de la energía, provocando el racionamiento energético y a una mayor pobreza. El Banco Mundial indica que esta situación retrasa el cumplimiento del Objetivo 7 de desarrollo sostenible (ODS 7) que consiste en el acceso universal de la población a energía confiable, asequible, moderna y sostenible para el año 2030 [1].

Perú no es ajeno a esta situación, siendo un país altamente dependiente de combustible fósil. Las energías renovables de biomasa residual lignocelulósica de cultivos como el algodón, representan una alternativa para poder hacer frente a esta problemática de acceso a la energía. Sin embargo, el uso de estos materiales para la producción de biocombustibles sólidos (briquetas y pellets) deben ser tratados previamente, debidos a sus características: higroscópica, biodegradable, de baja densidad ($200 - 250 \text{ kg/m}^3$) [2], gran volumen y de difícil trituración [3] así como contener aproximadamente 20% de carbón fijo y 80% de material volátil. Por ello, uno de los tratamientos para la modificación de estas propiedades es el proceso de la torrefacción [2], [3].

Los autores Pérez, Barrera y Ramírez [4] definen a la torrefacción como un proceso de pirólisis atenuada, debido al uso de intervalos de temperatura entre 200 a 300 °C. El autor [5] recalca que en este proceso se incrementa la temperatura lentamente, con escasa concentración de oxígeno, evitando la ignición del material biomásico por la alta inflamabilidad del oxígeno. Lo interesante de este tratamiento es que la biomasa mejora sus características [6] físicas (absorción de humedad), químicas y calóricas [7]. Asimismo, la biomasa torrefactada incrementa la resistencia mecánica y manipulación de los productos fabricados, así como la resistencia a la humedad en relación con la biomasa sin tratamiento [2]. Estas características obtenidas por la torrefacción permiten la producción de biocombustibles de segunda generación, ya que al ser sometida la biomasa lentamente a estas temperaturas, ésta pierde compuestos volátiles (fracción orgánica). Con la remoción de los mismos, se elimina gran parte del oxígeno de la biomasa [3], incrementando su poder calorífico de 18,5 MJ/kg hasta 23 MJ/kg [3], [5]. Cabe mencionar que la pérdida de masa



(densificación energética) de la biomasa también se debe a que en este rango de temperatura se degrada la hemicelulosa alcanzando una máxima velocidad de descomposición en el rango de temperaturas de 225 °C a 325 °C; y en menor medida, la lignina (descompone gradualmente en intervalos de temperaturas de 250 °C a 500°C) [8]. A continuación, se describen los aspectos generales del proceso utilizando los reportes más recientes de la literatura.

Etapas del proceso de torrefacción. Bergman [9] define cinco etapas del proceso de torrefacción:

- a) Calentamiento inicial: Consiste en realizar el calentamiento de la biomasa, desde la temperatura ambiente (25 °C aprox.), esta etapa termina cuando se produce una evaporación acelerada (95 °C).
- b) Secado I: se produce cuando la velocidad de evaporación y la temperatura de la biomasa son constantes (95 °C a 105 °C). En esta etapa se usa por completo la energía térmica de entrada al sistema para producir la entalpía de vaporización.
- c) Secado II y calentamiento intermedio: Al evaporar toda el agua superficial, se incrementa la temperatura mientras el agua restante se difunde a través de los poros de la biomasa requiriendo mayor energía y tiempo para superar las fuerzas capilares. Poco a poco se libera toda el agua unida físicamente, quedando la biomasa libre de humedad. El autor menciona también que en esta etapa los compuestos volátiles (terpenos) pueden volatilizarse. A los 200°C de temperatura se finaliza esta etapa.
- d) Torrefacción: Es el núcleo del proceso, fases: 1) fase de calentamiento a temperatura constante y 2) fase de enfriamiento. Al estar la temperatura a 300 °C, se produce la descomposición termoquímica de la biomasa, reduciendo significativamente la masa del material y por otro lado generando la densificación energética del material torrefactado.
- e) El enfriamiento de sólidos: En este período se completa el enfriamiento a la temperatura final deseada (debe ejecutarse en ausencia de oxígeno debido a los peligros de incendio o explosión del polvo de alta reactividad).

El cultivo del algodón en Perú

El cultivo de algodón en el Perú data desde tiempos ancestrales, con datos desde los 8,000 mil años en las culturas prehispánicas - esto se puede corroborar al observar los mantos de la cultura Paracas [10]. A nivel mundial el algodón peruano tiene gran demanda para su exportación por su gran calidad y fibra larga, así como por presentar especies nativas cuya característica es la diversidad de colores, la cual no requiere teñido, constituyéndose en un producto amigable para el ambiente. Por ello, este cultivo genera gran cantidad de biomasa residual arbustiva, cuyos componentes principales son la celulosa y la lignina, que podrían ser utilizados para la obtención de productos renovables, como materia prima para la producción de biocombustibles [11, 12]. Actualmente estos materiales son quemados al final de cada campaña, perdiendo una gran oportunidad de valorizarse según la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (D.L. 1278) [14] e incrementar el poder adquisitivo del productor.

El algodón es una malvácea distribuida ampliamente a nivel mundial [13], por lo que no es una excepción encontrar la especie *Gossypium barbadense*, también conocida por el nombre de sus dos variedades Tangüis y Pima en la zona de Lima, distrito de La Molina, Perú. Estas malváceas son utilizadas en la industria textil, para la producción de hilos, telas y tejido de punto para la confección de prendas de exportación de grandes marcas, . Por lo expuesto, es importante la caracterización física y química de estos materiales y del material torrefactado para su uso energético. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es realizar la torrefacción de los residuos de cosecha del cultivo de algodón, como son la broza y tallo y la caracterización fisicoquímica: análisis proximal (porcentajes de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo), análisis elemental (porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno) y el análisis lignocelulósico (porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa); y la caracterización energética (poder calórico superior) tanto de la biomasa residual como del material torrefactado.



Materiales y métodos

Los cultivos de algodón se encuentran ubicados dentro del campus universitario de la Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima, Perú. El manejo de los cultivos es de forma manual: una vez cosechado el algodón, se abandonan los arbustos en los campos. Posteriormente, se procede a la quema de los arbustos para evitar la proliferación de vectores de enfermedades. El área de cultivo de algodón es de 2.96 hectáreas, y se realizó un muestreo al azar, siendo el tipo de muestra compuesta, tomando un kilogramo de muestras de broza y tallos de algodón respectivamente.

Acondicionamiento de la muestra

Las muestras de broza y tallo de algodón fueron secadas en estufa a 105°C por 24 horas aproximadamente y enfriadas en un desecador de vidrio. Posteriormente las muestras fueron trituradas en un molino de cuchillas GRINDOMIX GM 300 de la marca Retsch, para luego ser tamizada, con los tamices N° 20, 40 y 60. Cabe indicar que se realizaron 3 repeticiones para cada análisis indicado en este estudio, para obtener el valor promedio. Se realizó la caracterización fisicoquímica y energética del algodón, mediante el uso de métodos estandarizados siendo estos análisis los siguientes:

Análisis proximal

Consiste en determinar el contenido de % Humedad, % material volátil, % cenizas y % carbono fijo mediante el método ASTM D7582 [19] y utilizando el equipo analizador termogravimétrico TGA701 de la marca LECO.

Análisis elemental

Consiste en determinar el contenido de % de Carbono, % de Nitrógeno, % de Hidrógeno mediante el método ASTM D5373 [20] y utilizando el equipo analizador elemental CHN628 de la marca LECO. Asimismo, se determinó el % de Oxígeno utilizando el equipo analizador adicional de micro oxígeno O628 de la marca LECO.

Análisis del contenido energético (Poder Calorífico Superior)

Para determinar el poder calorífico superior de los materiales en estudio se utilizó el método de la bomba Calorimétrica, siguiendo los pasos de la norma ASTM D5865-13 [21] y utilizando el equipo calorímetro AC600 de la marca LECO.

Determinación de la composición química lignocelulósica

La composición lignocelulósica de algodón está conformada por: lignina, celulosa y hemicelulosa, moléculas que le dan estructura y resistencia al algodón. Se determinó la composición química de la materia prima en el Laboratorio de Química, según las siguientes normas y métodos detalladas en la Figura 1. A continuación, se procede a explicar las mismas:

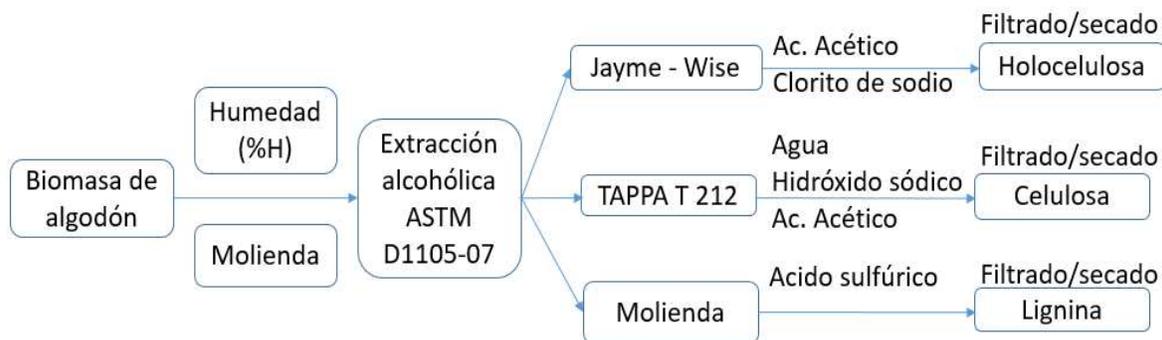


Figura 1. Esquema del análisis lignocelulósico. Fuente: [22]

Lignina: La pared celular de las plantas está conformada por lignina (heteropolímero) [15] proveyendo resistencia a la tensión y a la presión hídrica, así como rigidez estructural [16]; así como soporte a células especializadas en sostén y almacenamiento [17].

Celulosa: Principal componente de la biomasa, puede ser utilizado en la obtención de productos renovables, materia prima para biocombustibles y en la identificación de especies maderables [11], [12].

Hemicelulosa: Estructura polimérica compleja de carbohidratos, ramificada compuesta por la unión de pentosas, hexosas y ácidos de estos azúcares. Tiene como función brindar rigidez a la estructura vegetal (18).

Torrefacción



Se realizó la torrefacción de los residuos del cultivo de algodón (tallo y broza) a temperaturas de 200°C, 250°C y 300°C en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), de la UNALM. La torrefacción se realizó en una atmósfera inerte generada con nitrógeno, con una razón de calentamiento de 10°C/min y un tiempo de residencia de 30 minutos.

Rendimiento

El porcentaje de rendimiento se determinó a partir de la masa de los productos torrefactados en función de la temperatura y el tiempo de la torrefacción aplicada a la biomasa de los residuos de cosecha de algodón (broza y tallo) en base seca. Se calculó el rendimiento [9] del material torrefactado obtenido, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Masa del Torrefactado}}{\text{Masa de la biomasa}} \times 100$$

Resultados

Producción de torrefactados de los residuos de cosecha de algodón

En la Figura 2 se muestra el proceso de torrefacción de la broza de algodón a las temperaturas de 200, 250 y 300 °C.



Figura 2. Proceso de Torrefacción de broza y tallo de algodón a las temperaturas: (a) 25°C, (b) 200°C, (c) 250°C y (d) 300°C.

En el Cuadro 1, se muestran los resultados promedios obtenidos de los torrefactados elaborados. El rendimiento obtenido se encuentra dentro del rango (10 - 85) %, observándose que conforme se incrementa la temperatura entonces el rendimiento en masa decrece.

Cuadro 1. Análisis físico del torrefactado de broza de algodón (BA) y tallo de algodón (TA).

Torrefactado	Temperatura (°C)	Biomasa (g)	Torrefactado (g)	Rendimiento (%)
BA	200	17,32 ± 0.06	12,50 ± 0.26	72,18 ± 1.33
BA	250	17,59 ± 0.19	8,52 ± 0.06	48,41 ± 0.77
BA	300	21,38 ± 0.58	8,61 ± 0.21	40,28 ± 2.05
TA	200	20,76 ± 0.17	17,15 ± 0.07	82,61 ± 1.01
TA	250	20,86 ± 0.41	8,62 ± 0.25	41,32 ± 1.57
TA	300	20,60 ± 0.40	3,03 ± 0.03	14,69 ± 0.43

Caracterización fisicoquímica de la biomasa y sus torrefactados

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del análisis proximal y elemental de los residuos de algodón obtenidos para las diferentes biomásas y grados de torrefacción.

Cuadro 2. Composición fisicoquímica de la biomasa y sus torrefactados.

Parámetro	Unidad	Broza de algodón	Broza de algodón torrefactada			Tallo de algodón	Tallo de algodón torrefactada		
			200°C	250°C	300°C		200°C	250°C	300°C
HR	% bh	18,63	7,15	7,89	8,94	10,24	5,22	8,19	8,43
MV	% bs	75,51	70,24	50,72	44,08	83,29	78,36	54,72	53,37
CZ	% bs	12,29	15,04	26,63	30,74	4,56	5,92	13,51	31,27
CF	% bs	12,20	14,72	22,65	25,18	12,15	15,72	31,77	15,36
C	% bs	37,14	43,00	45,44	50,04	41,10	43,93	53,83	43,63
H	% bs	6,23	5,32	3,90	3,55	6,28	5,37	3,63	2,89
O	% bs	43,52	35,72	22,85	14,59	43,57	44,24	27,70	20,70
N	% bs	0,52	0,92	1,18	1,07	0,45	0,54	1,33	1,52

Nota: Porcentajes de (HR): humedad, (MC): material volátil, (CZ) cenizas, (CF): carbono fijo, (C) carbono, (H): hidrógeno, (N): nitrógeno y (O): oxígeno determinados en (b.h): base húmeda y (b.s): base seca.



En el análisis proximal se encontró que el porcentaje de humedad, cenizas y carbón fijo de los torrefactados de broza de algodón se incrementan al aumentar la temperatura, con excepción del carbono fijo del torrefactado de tallo de algodón que se reduce a 300°C. Asimismo, en el análisis elemental para determinar el porcentaje de carbono, se observa, que en el torrefactado de broza de algodón, este valor se incrementa conforme va aumentando la temperatura, en cambio, en el torrefactado de tallo de algodón, el máximo valor lo presenta a una temperatura de 250°C. Finalmente, los porcentajes de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno disminuyen cuando se incrementa la temperatura.

Caracterización energética de la biomasa y sus torrefactados

El poder calorífico superior (PCS) de broza y tallo de algodón resultó en 14.23 y 15.50 MJ/kg, respectivamente, y el PCS de sus torrefactados a 250°C y 200°C se incrementaron, tal como se observa en la figura 3, con un aumento del PCS de la muestra de broza de algodón al ser sometida a la torrefacción de 200°C a 250°C, con valores de 17.86 a 20.21 MJ/kg, respectivamente. Este aumento es paralelo a una gran pérdida de masa causada por la descomposición de la hemicelulosa estructural de la muestra. Sin embargo, entre 250°C a 300°C se observa que el PCS disminuye levemente, de 20.21 a 17.68 MJ/kg, respectivamente.

En el caso del tallo de algodón, el máximo PCS resultó en 18.74 MJ/kg, a una temperatura de torrefacción de 200°C, y conforme se incrementa la temperatura de 250°C a 300°C, el rendimiento energético disminuye de 18.00 a 15.40 MJ/kg, respectivamente.

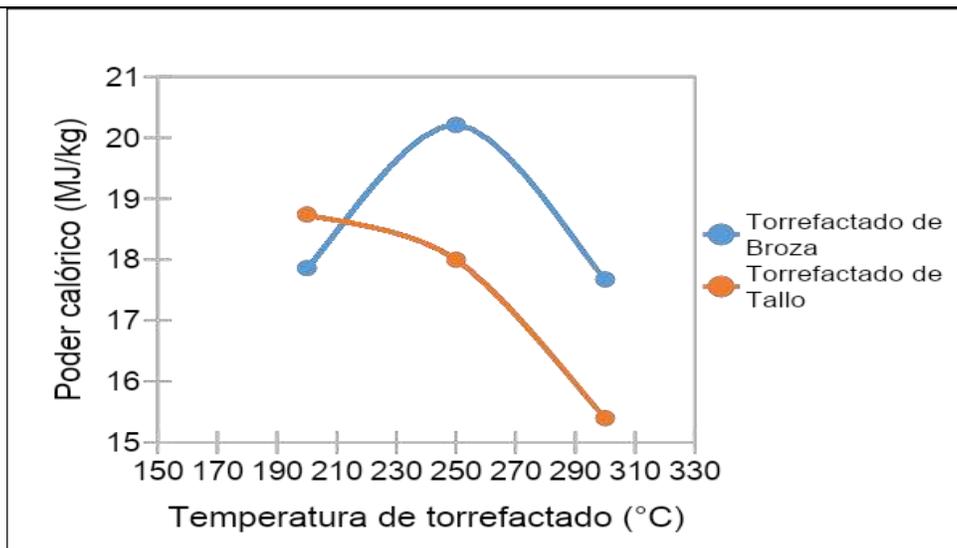


Figura 3. Análisis de contenido energético de los torrefactados de broza y tallo de algodón.

Composición química lignocelulósica

En el cuadro 3 se presentan los resultados del análisis lignocelulósico de los residuos de algodón, donde se observa que el contenido de celulosa es mayor en la broza que en el tallo de algodón. Asimismo, el contenido de lignina es mayor en el tallo que en la broza.

Cuadro 3. Análisis estructural lignocelulósico

Muestra:	% Extractivos	% Celulosa	% Holocelulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Broza	11.16	75.80	31.90	43.90	19.66
Tallo	09.02	58.57	50.20	8.37	23.31

Conclusiones y/o recomendaciones

Los resultados respaldan que es posible la producción de biocombustibles sólidos a partir de los residuos de la cosecha de algodón mediante el proceso de torrefacción. Por otro lado, la broza de algodón no es una biomasa prometedora para obtener un biocombustible sólido



con mejores rendimientos energéticos cuando se le aplica procesos de torrefacción a temperaturas superiores a 250°C. Sin embargo, este parámetro podría aumentar cuando la muestra es sometida a torrefacción con temperaturas comprendidas entre 200°C y 250°C. Por otro lado, en las muestras de tallo torrefactas, el contenido energético disminuye a temperaturas mayores de 200°C.

Agradecimientos

Laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias y Programa de Algodón de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

Referencias

- [1] BM (Banco Mundial). 2022. “La pandemia de COVID-19 demora el avance hacia el acceso universal a la energía”.
- [2] L. E. Arteaga, C. Segura, K. Diéguez. 2016. Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. Revista de química teórica y aplicada, ISSN 0001-9704, Vol. 73, Nº. 573, pp. 60-68, 2016.
- [3] M. Phanphanich, S. Mani, “Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass”, Bioresour. Technol. vol 102 pp 1246–1253, 2011. doi:10.1016/j.biortech.2010.08.028.
- [4] J. Pérez, R. Barrera, G. Ramírez, “Integración de plantaciones forestales comerciales colombianas en conceptos de biorrefinería termoquímica: una revisión”. Colombia Forestal, vol. 18 (2), no 1, pp 273-294, 2015.
- [5] Y. Chen, H. Yang, Q. Yang, H. Hao, B. Zhu, & H. Chen. Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation. Bioresource Technology, 156, pp. 70-77, 2014. doi:10.1016/j.biortech.2013.12.088
- [6] M. Wu, D. Schott, & G. Lodewijks. Physical properties of solid biomass. Biomass Bioenergy, (35), 2093 - 105, 2011. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.020
- [7] MJC. Van der Stelt, H. Gerhauser, JHA. Kiel, KJ. Ptasinski. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. Biomass Bioenerg 35:3748–62, 2011.
- [8] R. Guillén, J. Poggi. Aprovechamiento Sostenible de Los Residuos Forestales para la Producción de Pellets de Biomasa Leñosa Torrefactada. Saber y Hacer. Revista de Ingeniería de la USIL. Vol. 1, Nº 2, Segundo semestre 2014. pp. 88-123, 2014.
- [9] P.C.A. Bergman, “Development of torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations”, ECN report, ECN-C—05-013, Petten, 2005.

-
- [10] M. Escobar. Algodón, con el Perú en su ADN. Cuando el Perú exporta textiles, también transmite historia e identidad cultural. 28/11/2021.
- [11] R. De Souza, F. Gomes, E. Brito, R. Costa-Lelis, L. Ribas-Batalha, F. Almeida-Santos & D. Longue-Junior. A review on lignin sources and uses. *Journal of Applied Biotechnology and Bioenergy*, 7, pp. 100-105, 2020. doi: 10.15406/jabb.2020.07.00222
- [12] O. Yu, & K. Kim. Lignin to materials: A focused review on recent novel lignin applications. *Applied Sciences*, 10(13), 4626, 2020. doi: 10.3390/app10134626
- [13] M. Maya, L. Gonzales, A. Restrepo, "Compuestos antimicrobianos para textiles y sus métodos de caracterización". *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 16, no 31, pp. 33-54, 2017.
- [14] Decreto Legislativo N° 1278. Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Normas Legales. El peruano. Lima, 2018.
- [15] W. Lucas, A. Groover, R. Lichtenberger, K. Furuta, S. Yadav, Y. Helariutta, ... P. Kachroo, P. The plant vascular system: evolution, development and functions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 55(4), pp. 294-388. 2013. doi: 10.1111/jipb.12041
- [16] H. Renault, D. Werck-Reichhart, & J. Weng. Harnessing lignin evolution for biotechnological applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, pp. 105-111, 2019. doi: 10.1016/j.copbio.2018.10.011
- [17] N. Lewis, & E. Yamamoto. Lignin: occurrence, biogenesis and biodegradation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 41, pp. 455-496, 1990. doi: 10.1146/annurev.pp.41.060190.002323
- [18] H. Escalante, J. Orduz, H. Zapata, M. Cardona, M. Duarte. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [19] ASTM, D7582-15. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. ASTM International, West Conshohocken, 2015.
- [20] ASTM, 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, 2016.
- [21] ASTM, D5865-13. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken, 2007.
- [22] M. Césare, F. Hilario, N. Callupe, L. Cruz, J. Calle, H. Gonzales, "Caracterización Física y Química del Bambú", *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 10, no 4, pp 1-13, 2019.



Optimización y evaluación de variables en la producción de biogás escala de laboratorio. Desarrollo de un caudalímetro hidráulico

Optimization and evaluation of variables in biogas production on a laboratory scale. Development of a hydraulic flowmeter.

Mariana Alarcón Rinaldi

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI – sede Rafaela). Argentina

malarcon@inti.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-5216-1784>

Diego Cazzaniga Arduzzo

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI – sede Rafaela). Argentina

dcazzaniga@inti.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0001-8462-5806>

Manuel Schmelzle

Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf). Argentina

manuelschmelzle@unraf.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0002-2513-9653>

Resumen

El laboratorio de Ambiente del Departamento de Valorización de Subproductos se ubica en Rafaela (Santa Fe). Hace varios años se trabaja en conjunto con la Universidad Nacional del Rafaela (UNRaf) abordando temas relacionados al aprovechamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Uno de ellos, es la obtención de biogás y biomasa por procesos anaeróbicos controlados. La ciudad de Rafaela cuenta con un complejo ambiental municipal en el cual se reciben los residuos domiciliarios clasificados. Una cooperativa de trabajo, allí instalada, recicla la fracción recuperable. No obstante, sigue siendo un desafío valorizar la fracción no-recuperable que se distribuye en las celdas que componen el relleno sanitario. Estos residuos orgánicos cuentan con una composición tal que permite su uso para la obtención de biogás y de un digestato susceptible de ser utilizado como abono para suelos cultivables. Para ello, entre ambas instituciones se trabajó en poner en marcha herramientas de medición y análisis para ensayar esta alternativa de aprovechamiento. El biogás producido se encuentra compuesto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), y en menor medida otros gases, entre los que se destaca el sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas altamente tóxico. El producto orgánico del proceso anaeróbico se usa con fines agronómicos, se denomina “digestato”.

Palabras clave

Biogás; biodigestión; residuos orgánicos; instrumentos de medición; caudalímetro hidráulico

Abstract

The Laboratorio de Ambiente in the Departamento Valorización de Subproductos is located in Rafaela (Santa Fe). For several years, has been working with the Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) addressing issues related to the use of Urban Solid Waste (Residuos Sólidos Urbanos - RSU). One of them is the production of biogas and biomass by controlled anaerobic processes. Rafaela has a municipal environmental complex in which classified



household waste is received. A work cooperative installed there recycles the recoverable fraction. However, it is still a challenge to value the non-recoverable fraction that is distributed in the cells that make up the landfill. These organic wastes have a composition such that they can be used to obtain biogas and a digestate that can be used as fertilizer for arable land. So, both institutions worked to implement measurement and analysis tools to test this alternative use. The biogas produced is mainly composed of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), and to a lesser extent other gases, among which hydrogen sulfide (H₂S), a highly toxic gas, stands out. The organic product of the anaerobic process is used for agronomic purposes, it is called "digestate".

Keywords

biogas; biodigestion; organic waste; measurement tools; hydraulic flowmeter

Introducción

Entre enero de 2020 y octubre de 2021 el grupo de investigación realizó tres ensayos de producción de biogás a escala laboratorio con una duración aproximada de 30 días c/u. Se generó un Sustrato Artificial Representativo (SAR) con características de composición fisicoquímica similar a la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), relación carbono/nitrógeno 25:1. La composición del SAR se basa en los resultados del proyecto de investigación realizado de 2018 a 2020 con el nombre "Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos, Fracción No Recuperable, con potencial recuperación energética y reutilización mediante tratamiento biológico. Caso de Estudio: Rafaela" (Convocatoria Proyectos de Investigación UNRaf. Resolución N°127/2018). Dada la heterogeneidad de residuos reales, el uso del SAR para los ensayos fue un aspecto importante para tratar de asegurar la constancia de condiciones en todos los experimentos.

Al ser la primera experiencia del equipo de trabajo en ensayos de producción de biogás, fue un gran desafío tanto el armado del sistema como la posterior medición de la calidad y la cantidad del biogás producido. La composición del gas se midió con analizadores específicos que cuentan con sensores característicos para CH₄, CO₂, O₂, H₂S, etc. La medición de caudal

de biogás fue otra línea que requirió de trabajo y desarrollo. En un principio, el gas se midió de manera discontinua mediante un sistema de desplazamiento de agua utilizando vasos comunicantes. Durante el tiempo que duran las mediciones, los biodigestores permanecen cerrados y por lo tanto se produce un aumento de la presión interna. Esta presión altera a los equilibrios de presiones parciales y solubilidad de gases en el sustrato, afectando de manera negativa a la actividad microbiológica. Para evitar este problema y sus consecuente complicaciones en la interpretación de los datos, el proyecto incluye el desarrollo de un caudalímetro automático. Se diseñó y construyó un prototipo que luego fue optimizado. En la tercera experiencia de ensayos, se logró conectar a uno de los dos digestores el caudalímetro desarrollado, midiendo continuamente el flujo de gas producido. Los resultados del caudalímetro demostraron buena reproducibilidad y estabilidad.

Materiales y métodos

Se realizaron 3 pruebas en diferentes tiempos y cada una por duplicado. La duración de cada experiencia fue de 20 a 30 días de acuerdo con la finalización de obtención de biogás. Los ensayos fueron realizados en biodigestores simples diseñados por el grupo, colocados dentro de un termorrefrigerador a una temperatura constante de 37 °C. En lo que respecta al inóculo, el objetivo fue inocular el sustrato con una cantidad y variedad lo más grande posible de microorganismos anaeróbicos. Para la primera experiencia se mezcló en una proporción 50:50 estiércol vacuno con el digestato de un biodigestor a escala real, en las siguientes experiencias se pretendió usar el propio digestato final de la primera experiencia como inóculo para el nuevo sustrato, pero debido a la interrupción por las restricciones sanitarias no fue viable y se usó digestato una planta de biogás activa con FORSU. En la tercera experiencia se bajó el aporte de inóculo de 50% a 30% (m/m).

En un principio, el gas se midió de manera discontinua con un sistema de desplazamiento de agua utilizando vasos comunicantes. Para evitar problema de acumulación de biogás por la medición discontinua y el posible efecto inhibitorio se desarrolló un caudalímetro



automático. En la tercera experiencia de ensayos, se logró conectar a uno de los dos digestores el caudalímetro desarrollado, midiendo continuamente el flujo de gas producido. Las medidas de flujo se registraron mediante un sistema Arduino UNO diseñado y construido para tal fin.

Digestores batch de medición no-continua en termorrefrigerador

Los ensayos para la producción de biogás se llevaron a cabo en reactores caseros tipo batch con alimentación única y evacuación del gas producido de manera no-continua. El diseño de los digestores evolucionó desde bidones transparentes fabricados en tereftalato de polietileno (PET) de 5 L (Figura 1) a bidones de policarbonato de 12 L (Figuras 2, 3, 4).



Figura 1. primer diseño de biodigestor y recipientes para medición de caudal.



Figura 2. tapa de goma.



Figura 3. tapa de plástico duro fabricada a medida con doble sello y rosca para conector.



Figura 4. dos digestores en termorrefrigerador.

Al principio se usaron tapas de goma empleadas comúnmente para la fermentación en la producción de cerveza (foto 2). Estas tapas presentaron pérdidas, principalmente cuando el reactor presenta una mínima sobrepresión por lo cual fueron reemplazados por tapones de poliuretano que se fabricaron por torneado a medida de los bidones, cuentan con sello doble de O-Ring y oficio con rosca para conectores neumáticos (foto 3). Por no contar con la posibilidad de extraer y medir continuamente el flujo de biogás generado, se realizó la evacuación del gas producido de forma manual. En la fase de acumulación de gas, la presión del gas en el digestor aumenta. La presión absoluta en el digestor tiene influencia en los gases disueltos en el sustrato y afectan la actividad biológica y, en consecuencia, la producción de biogás. Este efecto se debe tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados de cantidad y composición del gas producido. La evacuación continua del gas producido es un aspecto importante para un diseño de un biodigestor, pero requiere la posibilidad de la medición y el registro del gas producido.

Resultados

Cuadro 1. Resultados de mediciones de SAR y digestato

DETERMINACIÓN	1ra experiencia - enero 2020		2da experiencia - marzo 2021		3ra experiencia - septiembre 2021	
	SAR 1	digestato	SAR 2	digestato	SAR 3	digestato
Temperatura (°C)	20,0	17,6	20,0	20,0	20,0	20,0
Densidad (g/cm ³)	1,052	1,019	1,040	1,019	1,155	1,250
Humedad (%)	77,6	88,3	74,6	84,0	76,7	86,6
Sólidos Totales (%)	22,4	11,7	25,4	16,0	23,3	13,4
Sólidos Fijos (%)	5,90	2,74	4,53	5,84	6,71	4,30



Sólidos Volátiles (%)	16,5	9,0	20,9	10,1	16,6	9,1
Cenizas (% bs)	26,7	26,4	17,7	35,6	29,3	32,6
pH (1:5) (u de pH)	5,85	5,60	7,18	5,42	6,23	6,24
Conductividad Eléctrica (dS/m)	6,17	182,90	1,46	3,94	1,77	6,06
Materia Orgánica (% bs)	73,3	73,6	82,3	64,4	70,7	67,4
Carbono Orgánico (% bs)	40,7	40,9	45,7	35,8	39,3	37,4
Nitrógeno Total (% bs)	1,50	1,81	1,53	1,80	1,63	1,63
Nitrógeno Total Kjeldahl (% bs)	1,32	1,55	1,36	1,69	1,30	1,57
Amonio (NH ₄ ⁺) (% bs)	0,10	0,59	0,08	0,36	0,23	0,85
Carbono/Nitrógeno Total	27,1	22,6	29,9	20,0	24,1	23,0
FOS/TAC	2,79	4,02	-	7,42	-	3,79

Analizando parámetros como ST y SV se determinó que hubo una degradación de más de un 50%. El pH también manifiesta una disminución indicando cierta acidificación de los digestores con la consecuente finalización del proceso de digestión anaeróbica. La materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno total se mantuvieron relativamente constantes a lo largo de la duración de cada una de las experiencias. Se comprobó la presencia de metano en los gases producidos mediante el uso de un medidor de gases específico.

Medición Caudal de biogás

Para el tratamiento, purificación y medición del gas con equipos de baja complejidad, se desarrolló un instrumento que permite medir los caudales bajos de biogás producido en los biodigestores a nivel laboratorio. El principio seleccionado para su funcionamiento se basa en la medición volumétrica del líquido desplazado por el gas.

Etapas del desarrollo realizado:

- ✓ Pruebas del funcionamiento del principio en botellas conectadas con mangueras (vasos comunicantes – Figura 5).
- ✓ Mejora de diseño y aumento de volumen, (Figura 6 - de izquierda a derecha biodigestor 12 L, manguera para gas, recipiente de agua 12 L, manguera transparente para salida agua y recipiente de medición de volumen).
- ✓ Diseño nuevo compacto de vidrio en colaboración con empresa Figmay SRL con sensor de nivel (flotante) y válvula electromagnética para la automatización del sistema (Figura 7).
- ✓ Caudalímetro completamente automatizado y con registro y análisis de datos por microprocesador Arduino UNO, prueba exitosa del medidor en la 3ra experiencia de producción de biogás (Figura 8).

El desarrollo del caudalímetro automatizado para pequeños caudales se completó con éxito en diferentes etapas. El diseño final mostró su funcionalidad en la medición durante 30 días en la tercera experiencia de la producción de biogás. Se identificaron aspectos potenciales de optimización, tanto en el tamaño como la integración del equipo, y mejoras constructivas con el fin de lograr una mayor precisión y robustez durante el proceso de medición.





Figura 5. caudalímetro simple y bajo volumen.



Figura 6. caudalímetro simple, diseño avanzado.



Figura 7. caudalímetro diseño compacto con flotante.



Figura 8. caudalímetro automatizado con registro de datos midiendo biogás.

Relación FOS/TAC (ácidos orgánicos volátiles (FOS) / carbono inorgánico total (TAC))

Se desarrolló la técnica en el laboratorio y la capacitación del personal a partir de bibliografía y recursos instrumentales propios del Laboratorio de Ambiente - Departamento Valorización de Subproductos de INTI en Rafaela. Para conocer con exactitud y documentar durante un período prolongado de tiempo la evolución del biodigestor y garantizar una producción óptima de biogás se puede evaluar la relación FOS/TAC. Esta se utiliza para monitorear la estabilidad del proceso de fermentación y de esta manera cualquier cambio puede ser detectado tempranamente y corregido de un modo específico para así mantener los parámetros de proceso dentro de los límites establecidos. Basta con realizar dos determinaciones volumétricas ácido-base sobre el sustrato de fermentación y calcular

luego el cociente de los resultados obtenidos, que debe estar entre 0,3 y 0,4 mg ácido acético (HAc)/mg carbonato de calcio (CaCO_3), valores a los que se considera que la producción de biogás es máxima [1]. En definitiva, la relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad de compensación alcalina es una medida del riesgo de acidificación en un biodigestor, capaz de detener la generación de biogás en modo irreversible, si no se la mitiga a tiempo.

Producción y composición del biogás

La producción de gas fue medida discontinuamente usando el caudalímetro de desplazamiento simple. Los intervalos entre las mediciones variaron entre 1 y 5 días, manteniéndose el digestor cerrado entre estas determinaciones. Como consecuencia de esto, la presión dentro del digestor aumenta generando complicaciones prácticas para realizar las medidas de cuantificación, ya que usando el caudalímetro simple se generan errores cuando el flujo es grande. Cabe mencionar que la presión en el digestor tiene una influencia negativa en los procesos biológicos.

Los resultados de la cantidad producida de biogás mostraron valores considerables al principio de los ensayos. Dentro de los primeros 7 días, el caudal medido fue alto y durante el resto del ensayo los valores fueron descendiendo de manera continua. La composición del gas medido mostró concentraciones de metano relativamente bajas (entre 0 % y 6 %). Además, las mediciones mostraron la presencia de oxígeno en los digestores, entre el 1 - 2 %. Esto indica que las condiciones en los digestores no lograron ser totalmente anaeróbicas. Por su parte, los valores de CO_2 registrados son de entre 25 y 60 %, estos son valores que pueden considerarse de normales a altos. La producción de ácido sulfhídrico medida (en disolución acuosa, H_2S) también fue baja, esto es esperable teniendo en cuenta que su generación requiere condiciones muy similares a la del metano.



Con el inóculo usado se buscó agregar al proceso una variedad amplia de bacterias anaeróbicas. El intervalo de pH requerido para la metanogénesis es de 6,5 – 8 [2]; los resultados demuestran valores pH de SAR e inóculo por debajo de estos, también el digestato final muestra una acidez superior. El SAR inicial presentó un valor de pH cercano a 5,9 en la primera, y 7,2 en la segunda experiencia. El pH bajo probablemente es la principal razón por la cual se observó una baja producción de metano en los ensayos. Otro parámetro indicativo de cambios en el medio (incluido el pH) es el parámetro FOS/TAC cuya función es detectar riesgos de acidificación del sistema con anticipación, y su intervalo óptimo es entre 0,3 y 0,4. Los resultados de los análisis demuestran valores que superan los óptimos de manera significativa con números de 1,7 a 9,8. Esto indica el exceso de ácidos orgánicos volátiles y además la baja capacidad de compensación alcalina del sustrato.

Prueba del caudalímetro automatizado desarrollado: La medición continua de caudal es un aspecto muy importante en la investigación de la producción de biogás. Se pudo demostrar que el equipo desarrollado es apto para medir el caudal de gas producido de manera continua y fiable, pero también con un gran potencial de mejora. A pesar de que solo se realizó un ensayo en una digestión real, un análisis de los datos obtenidos reveló que se debe optimizar su generación automática para disponer de una base de datos más amigable para su interpretación.

Conclusiones

El presente proyecto es la primera experiencia en la temática del grupo interdisciplinario de UNRaf, INTI y UNRC. En este contexto, el mayor logro no se encuentra en los resultados de producción de biogás propiamente dicha, sino el aprendizaje del grupo en la puesta en marcha, generación y medidas de variables antes, durante y luego del proceso. Durante la ejecución del proyecto, el grupo diseñó y mejoró en etapas tanto los digestores batch, como el proceso de medición de caudal de gas. Además, se diseñó un sustrato artificial representativo y se utilizaron diferentes inóculos para activar los procesos biológicos. El grupo de analistas incorporó el protocolo para el parámetro FOS/TAC, un valor

indispensable para el monitoreo de procesos de biogás. Se pudo identificar y resolver durante la ejecución del proyecto las falencias constructivas de los digestores usados. El sistema batch fue operado sin alimentación continua, se observó exclusivamente el sustrato agregado al principio del proceso. La falta de una salida para la toma de muestras durante el proceso hace difícil el monitoreo durante el proceso de digestión. Así mismo, la carencia inicial de equipamiento técnico para la medición continua del caudal de gas producido afectó de manera negativa requiriendo un gran esfuerzo para la medición manual.

De manera general, se debe observar que la pandemia limitó el tiempo de acceso a los laboratorios imposibilitando la concreción de un mayor número de ensayos que hubiesen permitido avances más significativos en la investigación. Finalmente, durante la pandemia se utilizaron las facilidades que permite la virtualidad para realizar seminarios bisemanales destinados a la capacitación interna del equipo e invitar referentes externos (ej. UNVM, UNSL, INTI Cuyo). De manera general, se puede decir que la concreción del presente proyecto permitió aumentar la experiencia del grupo en la investigación, y consolidarlo con una base sólida para futuros proyectos en la temática del biogás.

Referencias

- [1] Ulrich Lossie; Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC; 2001.
- [2]Wiley-VCH; Deublein, Steinhauser; “Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction”; pp. 100-125; 2008.



Propiedades mecánicas de materiales compuestos basados en yeso y jacinto de agua

Mechanical properties of gypsum-water hyacinth composite materials

Alba Chaves-Zapata¹

Dpto. Física Aplicada, Universidad de Extremadura, Badajoz

albacz@unex.es

[0000-0002-5444-2782](tel:0000-0002-5444-2782)

Mara Olivares-Marín²

Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales, Universidad de Extremadura, Badajoz

maraom@unex.es

[0000-0002-9797-7904](tel:0000-0002-9797-7904)

Estíbaliz Sánchez-González²

Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales, Universidad de Extremadura, Badajoz

estibalizsg@unex.es

[0000-0002-7798-818X](tel:0000-0002-7798-818X)

Silvia Román Suero¹

Dpto. Física Aplicada, Universidad de Extremadura, Badajoz

sroman@unex.es

[0000-0001-8851-2710](tel:0000-0001-8851-2710)

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de un material compuesto basado en tallo de jacinto de agua (water hyacinth stem, WHS) y yeso (G). El jacinto de agua es una especie acuática invasiva que se encuentra en las cuencas de los ríos del suroeste de España, y en otras muchas cuencas fluviales en todo el mundo y está ocasionando grandes daños medioambientales. Se estudiaron diferentes proporciones WHS:G, incluyendo una muestra control fabricada íntegramente con yeso y dos muestras fabricadas con alto contenido de WHS (50:50 y 30:70). Los resultados mostraron que a medida que la cantidad de WHS en referencia al G se incrementa, las propiedades mecánicas del material compuesto disminuyen. Dado que estudios realizados previamente mostraron un notable beneficio en cuanto a las propiedades de aislamiento térmico y acústico a medida que se aumenta la cantidad de jacinto de agua, se pone de manifiesto la necesidad de encontrar una situación de compromiso. Por otro lado, la resistencia a la flexión obtenida para algunas de las muestras preparadas fue ligeramente superior a otros resultados encontrados en la bibliografía cuando se utiliza otro tipo de biomasa.

Palabras clave

Biomasa, material compuesto, biomateriales, construcción, caracterización mecánica

Abstract

This work has studied the mechanical properties of a composite material composed of water hyacinth stem (WHS) and gypsum (G). WHS is an aquatic invasive species that can invade the rivers of southwest Spain and of many other areas in the world, and is seriously damaging the ecosystems. Different proportions WHS:G were studied, namely a control sample made with pure G and two samples with WHS proportions (50:50 y 30:70). The results showed that as WHS proportion increases, the mechanical resistance of the composite material deteriorate, despite it is also associated to an improvement of thermal and acoustic insulating characteristics. On the other hand, the flexural strength of the



samples prepared in this studied showed better mechanical behavior as compared to other biomass-based composite materials shown in the literature.

Keywords

Biomass, composite material, biomaterials, building, mechanical characterization.

Introducción

La situación medioambiental a la que nos enfrentamos en la actualidad hace crecer el interés en diversos campos que busquen mejorar la circularidad de las economías, el empleo de residuos y el ahorro de recursos finitos, así como el ahorro energético en los procesos productivos. La bioarquitectura puede ofrecer una alternativa al empleo de determinados materiales de uso en construcción, puesto que el consumo de energía y las emisiones de CO₂ sitúan a esta industria entre las de mayor impacto medioambiental, y en esta línea, se han realizado diversos estudios sobre el uso de biomasa en materiales de construcción [1].

Entre ellos, se pone de manifiesto una gran variabilidad de condiciones de procesado, que implican mayor o menor consumo de recursos; igualmente, se encuentran ejemplos que añaden biomasa en diferentes estados de procesamiento. Así, por ejemplo, en algunos casos [2], la biomasa es añadida mediante procesos térmicos, y además se emplean resinas sintéticas como aglomerantes, en otros casos, la biomasa se somete previamente a un proceso de carbonización o hidrocarbonización [3], mientras que en otros el fraguado del material se realiza sin fuente térmica ni la biomasa es sometida a más operaciones que el secado.

En el caso concreto del uso de biomasa como relleno para la elaboración de morteros basado en yeso, se han obtenido resultados prometedores que cumplen con la normativa EN 13279-1 [4]; en general, se observa que las biomasa porosas y poco densas pueden llevar a una mejora de las propiedades de aislamiento térmico. Así, la bibliografía muestra resultados como los de Charai & col. [5] donde la adición de cáñamo disminuía la densidad

y mejoraban el aislamiento térmico del yeso. La adición de biomasas al yeso, también mejoran la absorción acústica del material como se puede comprobar en los estudios desarrollados por Kang & col. [6], cuyos resultados presentan una buena absorción acústica mediante la adición de cascarilla de arroz al yeso. En otro estudio desarrollado por Lannace [7] se puede comprobar cómo los compuestos fabricados con yeso y distintas biomasas (paja de trigo, desperdicios vegetales y madera de castaño) muestran una buena absorción acústica, con resultados similares a los que presentan materiales sintéticos porosos. Los trabajos que han estudiado simultáneamente el comportamiento térmico, acústico y mecánico de materiales compuestos con yeso son más escasos, y a menudo muestran que la última de las propiedades se ve mermada cuando aumentan las dos primeras. Por ejemplo, Pedreño-Rojas [8] desarrolló un trabajo en el que añadió madera reciclada en una matriz de yeso para fabricar nuevos compuestos ecoeficientes y se puede comprobar que un alto contenido de virutas de madera y aserrín mejoraron las propiedades de aislamiento térmico y absorción acústica, mientras que las propiedades mecánicas se vieron afectadas negativamente. También en el trabajo publicado por Petrella y col. [9] se comprobó cómo el aumento del contenido de paja de trigo en el compuesto con base de cemento incrementó las propiedades térmicas y acústicas y disminuyeron las mecánicas.

En este contexto, las autoras de este trabajo han encontrado en la esponjosidad del tallo del WHS un rasgo aliado para esta aplicación. Con estas premisas, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de materiales compuestos G:WHS. Previo al estudio sobre las propiedades mecánicas del material compuesto, se han desarrollado análisis sobre las propiedades de aislamiento térmico y absorción acústica. Los resultados encontrados en estos estudios previos nos llevaron a seleccionar las muestras para la caracterización mecánica. En este sentido, teniendo en cuenta las buenas propiedades presentadas por las muestras que emplearon un tamaño de partícula de 0,5 a 1 mm (WHS-B) y las que estaban formadas por una mayor cantidad de WHS, se determinó realizar el ensayo de flexión a las muestras con dicho tamaño de partícula y una proporción G:WHS de



70:30 y 50:50. A pesar de haber obtenido en estudios previos una mejora de los resultados térmicos y acústicos con la adición de WHS al material compuesto, se seleccionaron estas proporciones puesto que dada la densidad de ambos materiales, el volumen que ocupan las partículas de WHS es mayor que el del yeso, de manera que si se empleara una mayor proporción de WHS, sería difícil de asegurar la adhesión entre las partículas de la muestra. Igualmente se analizó una muestra de control fabricada de yeso con fines comparativos.

2. Materiales y métodos

2.1. Preparación de las muestras

Inicialmente para obtener la biomasa se solicitó un permiso a la Confederación Hidrográfica del Guadiana en su sede de Mérida (España), donde recolectamos la planta y la almacenamos en contenedores de 50 litros de capacidad para su transporte. En primer lugar, la planta fue dividida en tres partes (tallo, hoja y raíz), seleccionándose el tallo para nuestro objeto de estudio. Inicialmente, este se dejó secar a temperatura ambiente hasta que se redujo la mayor cantidad de agua. Seguidamente se empleó una estufa para un secado total a 100°C durante 24 horas. Una vez secos los tallos fueron cortados a trozos y triturados por lotes de pequeño volumen mediante una picadora comercial de tamaño medio (Jata). Los tallos triturados se tamizaron posteriormente mediante una tamizadora vibratoria (CISA), para obtener un tamaño de partícula de 0,5-1 mm. Por otro lado, el yeso que se ha empleado en este trabajo ha sido fabricado por la empresa Saint Gobain Placo Ibérica S.A. Se trata de un yeso de construcción de granulometría gruesa y de fraguado controlado.

Para la caracterización del material compuesto se fabricaron diferentes probetas para la medición de las propiedades. Para analizar las propiedades mecánicas, se fabricaron muestras rectangulares con unas dimensiones de 60x45x5 mm. Para la fabricación de las probetas el WHS fue mezclado con el yeso en las proporciones yeso/camalote seleccionadas como objeto de caracterización mecánica (70:30 y 50:50). También se fabricó una muestra control fabricada íntegramente de yeso con fines de comparación. Una vez realizada las

mezclas de los materiales, se añadió el agua en una cantidad de 0,62 cm³ de agua por g de material. Finalmente, para la fabricación de las muestras mediante moldeo con presión, se vertió la mezcla sobre un molde rectangular de aluminio y se prensó a 1 t mediante una prensa hidráulica durante 24 horas. Tras quitar las probetas de la prensa se dejaron fraguar y secar a condiciones ambiente durante 3 días.

2.2. Ensayos de flexión en 3 puntos

La flexión se puede considerar como la deformación presentada por un elemento estructural alargado a una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Esta propiedad puede ser medida aplicando una fuerza en el centro de la probeta apoyada en ambos extremos con el objeto de determinar la resistencia del material. Para la caracterización mecánica del material compuesto se han llevado a cabo ensayos de flexión en 3 puntos en una máquina universal de ensayos Shimadzu AG-IS equipada con una cédula de carga de 5 kN. Los ensayos se realizaron con una velocidad de travesía constante de 6mm/min y una distancia entre apoyos de 20 mm. Para el cálculo de la resistencia a flexión o módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (E), a partir de los valores obtenidos experimentalmente, se ha hecho uso de las siguientes ecuaciones:

$$\text{MOR} = 3 F L / 2 w h^2 \quad \text{Ec.1}$$

$$E = (L^3 / 4wt^3) * (\Delta P / \Delta x) \quad \text{Ec.2}$$

Donde F es la carga de fractura, L es la distancia entre los dos puntos de apoyo, w es el ancho de la probeta, h es la altura de la probeta y $\Delta P / \Delta x$ es la pendiente de la curva carga-desplazamiento.

Resultados

En la Figura 1 se muestran las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de flexión para las probetas preparadas con distintas proporciones WHS:G. Se puede



comprobar que el material fabricado con yeso en su totalidad (G) es rígido y resistente. La fase inicial hasta que aparece la primera grieta es lineal con una pendiente pronunciada. Tras aparecer la primera grieta el material rompe fácilmente, pasando directamente de una deformación elástica a la rotura. Estos resultados muestran que, aunque los materiales compuestos presentan una resistencia menor, su elasticidad es mayor, pues aun rompiendo con una fuerza menor, lo hacen más tarde. Como es de esperar, y en coherencia con los estudios de la bibliografía, a medida que se incrementa el contenido de WHS disminuye la resistencia a flexión. Esto es debido a que el refuerzo debilita la unión entre partículas y provoca que el material rompa aplicando una fuerza menor, si bien rompe más tarde porque la presencia de estas partículas hace que el material sea más elástico.

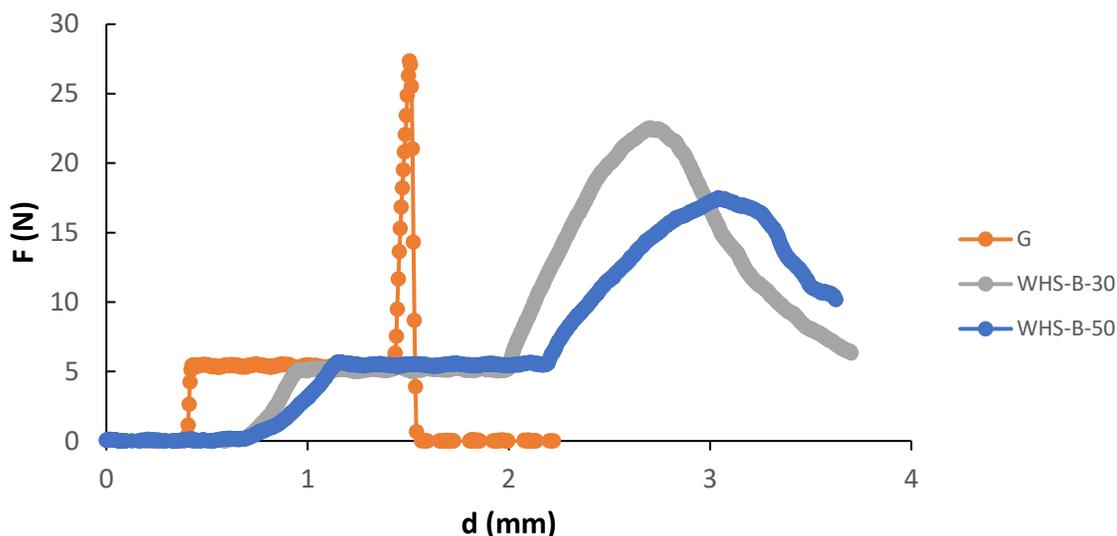


Figura 1. Curvas fuerza-desplazamiento para los materiales compuestos WHS:G

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión o módulo de rotura (MOR) se representan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades de flexión de los materiales compuestos

	Yeso (0% WH)	30%WH	50% WH

Fr (N)	35,97	32,18	13,12
Resistencia a flexión (Mpa)	1,78	1,11	0,43
Módulo Elástico (Mpa)	18848,25	1848,17	383,46
Conductividad térmica (W/mK)	0,583	0,400	0,417
NRC	0,15	0,2	0,25

Los mayores valores se han obtenido para el yeso, mientras que a medida que incorporamos WHS como relleno, estos valores decrecen de forma gradual. La literatura pone de manifiesto que añadir biomasa tiene en la mayor parte de los casos esta consecuencia sobre las propiedades mecánicas, a excepción de aquellos trabajos donde la biomasa fue añadida en fibras largas, para las que se encontró una mejora del módulo de flexión [2]. Por otra parte, aunque los valores de los materiales compuestos son más bajos que los del yeso, estos valores son superiores a los obtenidos por otros materiales compuestos analizados en otros estudios [10]

Conclusiones y/o recomendaciones

Los resultados mostraron que a medida que la cantidad de WHS en referencia al G se incrementa, las propiedades mecánicas del material compuesto disminuyen. Dado que estudios realizados previamente mostraron un notable beneficio en cuanto a las propiedades de aislamiento térmico y acústico a medida que se aumenta la cantidad de jacinto de agua, se pone de manifiesto la necesidad de encontrar una situación de compromiso. Por otro lado, la resistencia a la flexión obtenida para algunas de las muestras preparadas fue ligeramente superior a otros resultados encontrados en la bibliografía cuando se utiliza otro tipo de biomasa. Cabría pues, extender este estudio hacia la variación de otros parámetros en la fabricación de las probetas, como el tipo de aglomerante o el tamaño de partícula de biomasa. La adición de fibras a los materiales compuestos fabricados, destinadas específicamente a mejorar el módulo elástico se propone asimismo como una continuación del presente trabajo.



Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno, a la Agencia Española de Investigación por la financiación recibida a través del proyecto PID2020-116144RB-I00/AEI/ 10.13039/ 501100011033) y a la red RIMSGES en el marco del programa CYTED.

Referencias

- [1] Rylko-Polak, I, Komala, W, Bialowiec, A. Synergistic effect of biomass and industrial waste reuse in bio-composite construction materials for decreasing of natural resource use and mitigation the environmental impact of the construction industry. A review. *Materials*. 2022; 15: 4078.
- [2] I. I. Shuvo, M. S. Hoque, M. Shadhi, L. K. M. Khandakar. Flexural Strength and Load–Deflection Behaviour of Hybrid Thermoset Composites of Wood and Canola Biopolymers. *Advanced Fiber Materials*. 2021; 3:331–346
- [3] S. Yang, S. Wi, J. Lee, H. Lee, S. Kim. Biochar-red clay composites for energy efficiency as eco-friendly building materials: Thermal and mechanical performance. 2019; 373:844-855
- [4] Ranesi, A, Faria, P, Correia, R, Freire, M.T, Veiga, R, Gonçalves, M. Gypsum mortars with Acacia dealbata Biomass Waste Additions: Effect of Different Fractions and Contents. *Buildings*. 2022; 12: 339.
- [5] Charai, M., Sghiouri, H. Mezrhab ,A., Karkri , M. Thermal insulation potential of non-industrial hemp (Moroccan cannabis sativa L.) fibers for green plaster-based building materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 292: 126063.
- [6] Kang, C.W., Lee, N.H., Hang, S.S., Kang H.Y. Sound Absorption Coefficient and Sound Transmission Loss of Rice Hull Mat. *Journal of Korean Wood Science Technology*. 2019; 47(3): 290.
- [7] Iannace, G. The acoustic characterization of green materials. *Building Acoustics*. 2017; 24(2):101.
- [8] Pedreño, M., Morales, M., Pérez, F., Rodríguez, C. Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 166:690-705.
- [9] Petrella, A. et al. Use of cellulose fibers from wheat straw for sustainable cement mortars. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2018; 8:161.
- [10] Yu, J, Sugawara, R, Widyorini, R, Han, G, Kawai, S. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*. 2004; 50:62.

Utilización de residuos de poda de árboles para la producción de briquetas

Use of tree pruning waste for briquette production

Astrogildo Pires Bernardo

Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil

astrogildo.bernardo@mail.uft.edu.br

[ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7379-134X](https://orcid.org/0000-0001-7379-134X)

Juan Carlos Valdés Serra

Universidad Federal de Tocantins (UFT). Brasil

juancs@mail.uft.edu.br

[ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6203-2759](http://orcid.org/0000-0002-6203-2759)

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo investigar las propiedades físicas, químicas y energéticas de briquetas producidas a partir de residuos de *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti), con hojas (OCF) y sin hojas (OSF) colectadas en la Ciudad de Palmas Tocantins, Brasil. Tocantins es uno de los Estados Brasileños que componen la Amazonía Legal. El estado cuenta actualmente con 100.000 km de red de energía eléctrica, la cual está bajo la responsabilidad de Grupo Energisa. La actividad de distribución de energía eléctrica es



altamente generadora de residuos de poda proveniente de la vegetación que se encuentra a lo largo de la red eléctrica. Una de las atribuciones del Grupo Energisa como contratado por el servicio público es realizar la poda de la vegetación constante en la red eléctrica y también la disposición de los residuos acumulados por la actividad. Una disposición incorrecta de los residuos vegetales puede generar daños ambientales y eleva los gastos de transporte, como así ocupar grandes áreas. Una forma eficaz de solucionar este problema sería la compactación de los residuos de biomasa y su aprovechamiento energético en forma de briquetas. Este trabajo concluye que las briquetas producidas a partir de los residuos de poda de árboles de la especie estudiada presentaron propiedades semejantes a los propuestos en la literatura, por lo tanto, son aptas para el aprovechamiento energético. Además, se concluye, desde el punto de vista ambiental, que este aprovechamiento impacta positivamente, ya que evita la tala de árboles y reduce la emisión de gases de efecto invernadero.

Palabras clave

Biocombustibles sólidos; Biomasa compactada; Briquetas; Poda de árboles.

Abstract

The present study aimed to investigate the physical, chemical and energetic properties of briquettes produced from *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti) waste with leaves (OCF) and without leaves (OSF) collected in the City of Palmas Tocantins, Brazil . Tocantins is one of the Brazilian states that make up the Legal Amazon. The state is currently served by 100,000 km of electricity grid, which is under the responsibility of Energisa Company. The electricity distribution activity is highly waste-generating, given the pruning of vegetation along the electrical grid. One of the attributions of the public service provider is the maintenance of the vegetation pruning along the electrical network and, as a consequence, the management of the generated waste. Poor waste management causes environmental damage and entails high transport costs, in addition to compromising large areas for disposal. An effective way to solve this problem is the compaction of biomass, that is,

production of briquettes. It is concluded that the briquettes produced from Energisa Tocantins tree pruning residues meet the requirements proposed in the literature and, therefore, are suitable for energy use. It is also concluded that this study is feasible, from an environmental point of view.

Keywords

Solid Biofuels; Compacted biomass; Briquettes; Tree pruning.

Introducción

La actividad de distribución de energía eléctrica es altamente generadora de residuos, principalmente en la práctica de la poda de árboles a lo largo de la Red de Distribución. El problema es que solo una parte del volumen de residuos de la poda de árboles tiene algún uso económico, social y ambiental [1]. Además de los problemas ambientales que ocasionan, los residuos comprometen grandes áreas de disposición y altos costos de transporte. El tratamiento adecuado de este insumo puede ser la solución para mitigar la cantidad de residuos y, en consecuencia, la reducción de la presión ejercida sobre el medio ambiente [2]. Sin embargo, la biomasa residual procedente de la poda de la vegetación urbana ha mostrado aptitud para el aprovechamiento energético, ya que tiene un bajo valor comercial y produce un biocombustible de excelente calidad [3].

La biomasa vegetal se puede utilizar para obtener energía de dos formas: *i)* tradicional, obtenida por medio de la combustión directa de leña para cocción, secado y producción de carbón; o *ii)* moderna, obtenidos por medio de tecnologías de conversión avanzadas, tales como pirólisis de biomasa, generación de electricidad por medio de gas de síntesis o en la producción de biocombustibles sólidos por densificación (pellets y briquetas) [4].

El principal problema con el uso de residuos de poda de árboles para la generación de energía es la baja densidad energética. Una forma eficaz de solucionar este problema es la



compactación de biomasa, es decir, la producción de briquetas. Las briquetas son biocombustibles a base de biomasa vegetal molida y comprimida a alta presión. El resultado obtenido es un producto con alta densidad energética y buena resistencia mecánica, ventajas que posibilitan su transporte y almacenamiento [5]. El presente estudio tiene como objetivo investigar las propiedades físicas, químicas y energéticas de briquetas producidas a partir de residuos de *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti).

Materiales y métodos

El Estado de Tocantins es uno de los nueve estados que componen la Amazonía Legal. El estado, ubicado en el norte de Brasil, cuenta actualmente con 100.000 km de red eléctrica, que está bajo la responsabilidad del Grupo Energisa. Una de las atribuciones de este prestador de servicio público es el mantenimiento de la poda de vegetación a lo largo de la red eléctrica y, en consecuencia, la gestión de los residuos generados. En este contexto, se recolectó una muestra de la especie *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti) para componer este experimento [6].

Con el fin de preparar las muestras para el análisis de laboratorio, la biomasa residual del Residuo de Poda Urbana (RPU) fue recolectada junto con el mantenimiento de las Redes de Distribución (RD) en Cuadra 210 Sul, en el municipio de Palmas Tocantins, Brasil. Los tratamientos son: Oiti Sin Hojas (OSF), y Oiti Con Hojas (OCF). Las briquetas fueron fabricadas en el Laboratorio de Energía de Biomasa del Departamento de Ciencias Forestales y de la Madera (LEB/DCFM), en la ciudad de Jerónimo Montero/Espírito Santo/Brasil, a partir de residuos de poda urbana de *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti). Los residuos provenían del municipio de Palmas, Tocantins. La biomasa recolectada se secó al aire libre por un período de 21 días. Luego del secado, la biomasa fue sometida al proceso de molienda para una mejor homogenización de las partículas, con tamiz de 5 mm. Debido a los mejores resultados de compactación, obtenidos por medio de pruebas anteriores, se adoptaron 20 g de biomasa para cada briqueta, temperatura de 110 °C, tiempo de compactación de 5 min, tiempo de enfriamiento de 5 min y presión de 90 Bar. Después de

la producción, las briquetas se llevaron a aclimatación en un ambiente con una temperatura de 20 °C.

Para determinar la granulometría media, se utilizaron los métodos recomendados por la Norma NBR 7402/1982, adaptados para biomasa vegetal, utilizando tamices con aberturas de malla 18, 20, 40, 60 y 100. Para la determinación de la humedad se adaptaron los métodos recomendados por la Norma D1762-84 (ASTM, 2021b). La determinación de la densidad aparente se definió de acuerdo con la norma ASTM 5057-17 (ASTM, 2017) con la ayuda de un recipiente cúbico de volumen conocido. Se realizó análisis químico inmediato siguiendo los métodos propuestos por la Norma D1762-84 (ASTM, 2021b), para determinar el contenido de materiales volátiles, carbón fijo y cenizas, adaptado para biomasa vegetal. El poder calorífico superior (PCS) de la biomasa se midió en una bomba calorimétrica, modelo IKA C200, según lo recomendado por la norma DIN 51900 (DIN, 2000). La determinación de la densidad aparente de la briqueta se definió según la norma ASTM 5057-17 (ASTM, 2017). La prueba de compresión se basó en un método brasileño llamado “Prueba de Compresión Diametral”. Estas pruebas se llevaron a cabo para determinar la resistencia a la compresión de las briquetas. La briqueta se coloca entre dos discos que actúan comprimiéndola con una velocidad de 3 mm/min hasta que se produce la primera fisura. Finalmente, la briqueta se fracturará diametralmente. El equipo utilizado fue una máquina de ensayo universal EMIC DL10000 con una capacidad máxima de 100 kN.

Resultados y discusiones

La clasificación promedio de la biomasa utilizada fue entre malla 20 y 40 (80%). Una mezcla de partículas de varios tamaños da como resultado la materia prima ideal. La densidad final de la briqueta está influenciada por el tamaño inicial de las partículas, y una materia prima con una granulometría muy baja da como resultado briquetas más densas, sin embargo, necesita altas presiones y temperaturas para que las partículas se consoliden. La biomasa obtenida a partir de Residuos de Poda Urbana (UPR) tuvo una densidad aparente promedio



de 286,2 kg/m³. La determinación de la densidad aparente es fundamental para generar información útil para la logística y transporte de biomasa, ya que estima los datos reales de los volúmenes para el transporte.

Los resultados para el análisis inmediato de los tratamientos estudiados, considerando contenido de humedad (U), contenido de materiales volátiles (TMV%), contenido de cenizas (TCZ%) y contenido de carbono fijo (TCF%), se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores promedios de humedad (U), contenido de materia volátil (TMV), contenido de cenizas (TCZ) y contenido de carbono fijo (TCF) de las briquetas, observados después del análisis químico inmediato

Tratamiento	U (%)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
OSF	7.45 d	77.98 c	1.34 d	20.68 c
OCF	9.00 a	73.46 e	3.45 c	23.08 a

Observación: Oiti Sin Hojas (OSF) y Oiti Con Hojas (OCF)

La determinación de la humedad es fundamental en el uso de combustibles sólidos en la generación de energía, ya que cuanto menor sea su contenido, mejor será su capacidad para generar calor. Según [7], el contenido de humedad ideal para que la biomasa sea utilizada como combustible sólido debe estar entre los valores de 5-10% de humedad. Estos datos demuestran que la biomasa utilizada en la fabricación de briquetas está dentro de los estándares de la literatura citada, pudiendo así ser utilizada en el proceso. El mayor valor de Materiales Volátiles (MV) se observó para el tratamiento OSF (77,98%). La cantidad de materiales volátiles está directamente relacionada con la quema en el proceso de carbonización, porque cuanto mayor sea el contenido de materiales volátiles, más rápido será el quemado.

El contenido de cenizas para el tratamiento OSF (1,34%) cumple con los Estándares de Calidad de ISO 17225 – 3 (Estándares Internacionales para la Producción de Briquetas) para la certificación ENplus® A2, cuyo contenido de cenizas debe ser inferior al 1,5%. El Tratamiento OCF (3,45%) cumple con los requisitos mínimos de la Norma Austriaca ÖNORM M 7135, cuyo límite de contenido de cenizas es del 6% [8].

Valores bajos de contenido de cenizas son interesantes desde el punto de vista energético, ya que cantidades altas de cenizas reducen el poder calorífico, provocando pérdidas de energía. La quema de biomasa en calderas y hornos con alto contenido en cenizas implicará un proceso de remoción más regular y eficaz, debido a su abrasividad, que a largo plazo puede provocar corrosión en los elementos metálicos de los quemadores.

En cuanto al contenido de Carbono Fijo (FC), los tratamientos OCF y OSF presentaron promedios de 23,08% y 20,68%. Los combustibles con un alto índice de carbono fijo se queman más lentamente, lo que resulta en un largo tiempo de residencia de los combustibles dentro de los quemadores [9] recomiendan contenidos de carbono fijo entre 14 a 25%.

Los valores de poder calorífico superior (Cuadro 2) promediaron 19,4 MJ/kg. Los resultados encontrados para esta variable cumplen con los estándares de calidad de la norma ISO 17225 – 3 (Normas Internacionales para la Producción de Briquetas) para la certificación ENplus® A1, cuyo poder calorífico mínimo debe ser $\leq 15,5$ MJ/kg. El PCS es uno de los principales parámetros para expresar la capacidad de generación de energía para reemplazar los combustibles derivados del petróleo. Esta propiedad está directamente relacionada con la cantidad de energía que libera la madera en su combustión, siendo importante conocer la capacidad energética de la biomasa.[9].



Cuadro 2. Densidad aparente, poder calorífico superior (PCS) y densidad energética (DE) de la biomasa

Tratamiento	D. granel (kg/m ³)	PCS (MJ/kg)	DE (MJ/m ³)
OSF	296,12 b	19.4 ab	5.744,7
OCF	312,30 a	19.4 ab	6.058,6

La densidad energética está directamente relacionada con el poder calorífico de la biomasa y la densidad aparente. Por lo tanto, el valor de densidad aparente encontrado para la biomasa influyó en la densidad energética del material. Se encontró un valor promedio de 5.901,65 MJ/m³, considerado adecuado al compararlo con los residuos de poda de árboles analizados por [10], que obtuvo un valor medio de densidad energética en torno a 5.247,7 MJ/m³, utilizando el mismo método de cálculo. La densidad de energía es un parámetro importante para los combustibles sólidos, ya que evalúa la cantidad de energía almacenada en un volumen dado de material. Cuadro 3.

Cuadro 3. Densidad aparente (DA), energía (DE), resistencia a la compresión diametral (RTCD) de briquetas

Tratamiento	D A (kg/m ³)	DE (Mj/m ³)	RTCD (MPa)
OSF	1.131,46 d	21.950,32	1,88
OCF	1.248,96 a	1.248,96	1,98

Las briquetas producidas tenían una densidad aparente de 1.190,21 kg/m³ a 110°C. El valor encontrado se considera alto, lo cual es una característica deseable cuando se trabaja con combustibles sólidos para generar energía en forma de calor. Los resultados encontrados para esta variable cumplen con los estándares de calidad de la norma ISO 17225 – 3 (Normas Internacionales para la Producción de Briquetas) para la certificación ENplus® A1, cuya densidad aparente mínima debe ser ≤ 1.000 kg/m³.

Se observa un aumento de 4 veces en la densidad después del briquetado (densidad aparente $304,2 \text{ kg/m}^3$ y densidad aparente $1.190,22 \text{ k/m}^3$). La densificación por medio de la producción de briquetas, promueve un aumento en la densidad de la biomasa *in natura*. Este aumento de la densidad después de la compactación revela la importancia de los procesos de compactación de la biomasa para el mejor aprovechamiento de los materiales lignocelulósicos en la producción de bioenergía. El aumento de la densidad de las briquetas supone una disminución del volumen de biomasa, proporcionando una mayor concentración de masa en el mismo espacio.

Se observa que los mejores resultados de Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral (RTCD) para briquetas producidas con láminas, mostrados en el Cuadro 3, llegan a valores de 1,98 MPa.

Conclusiones

Se concluye que las briquetas producidas a partir de la especie *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti) cumplen con los requisitos propuestos en la literatura y, por tanto, son aptas para el aprovechamiento energético. El análisis inmediato, el Poder Calorífico Superior (PCS), la Densidad de Energía y la Resistencia Mecánica cumplen con los requisitos mínimos exigidos en las normas internacionales para biocombustibles sólidos (briquetas), por tanto, considerados adecuados. Además, se concluye, desde el punto de vista ambiental, que este aprovechamiento impacta positivamente, ya que evita la tala de árboles y reduce la emisión de gases de efecto invernadero.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del equipo del Laboratorio de Energía de Biomasa y de todo el Departamento de Ciencias Forestales y Ciencias de la Madera de la Universidad Federal de Espírito Santo (LEB/UFES) Brasil e al Curso de Maestría en Agroenergía de la UFT.



Referencias

- [1] N. G. Ribaski, “Aproveitamento de resíduos sólidos urbano madeireiro”, *Brazilian Journal of Technology*, vol. 2, p. 742–757, 2019.
- [2] D. P. da Silva, “Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital”, p. 124, 2016, [Online]. Available at: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-09112016-141125/publico/DissertacaoDafneSilvaVF.pdf>
- [3] P. G. Passaglia, S. T. Coelho, e M. J. do N. Anater, “APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE PODA NO CAMPUS AEROPORTO DA UNIVERSIDADE DE UBERABA-UNIUBE”, *BIOFIX Scientific Journal*, vol. 7, no 2, p. 160, jul. 2022, doi: 10.5380/biofix.v7i2.86113.
- [4] D. A. L. Silva, R. A. P. Filleti, R. Musule, T. T. Matheus, e F. Freire, “A systematic review and life cycle assessment of biomass pellets and briquettes production in Latin America”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 157, no November 2021, p. 112042, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.112042.
- [5] D. P. Garcia et al., “MAPA DOS PRODUTORES BRASILEIROS DE BIOCOMBUSTÍVEIS PELLETS”, 2018.
- [6] M. Ndumbo, “UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA ‘JÚLIO DE MESQUITA FILHO’ INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS-RIO CLARO unesp PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROBIOLOGIA APLICADA PROCESSO INTEGRADO PARA PRODUÇÃO DE XILANA, BRIQUETES E AÇÚCARES FERMENTÁVEIS”, 2021.
- [7] F. S. Amorim, M. X. Ribeiro, T. P. Protásio, C. H. A. Borges, e R. M. C. Costa, “Produção de briquetes a partir de espécies florestais”, *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, vol. 10, no 2, p. 34, nov. 2015, doi: 10.18378/rvads.v10i4.3779.
- [8] I. C. RANGEL, F. F. da SILVA, C. L. M. SOUZA, M. E. Junior, G. D. A. GRAVINA, e A. SHIMOYA, “NORMAS E PADRÕES PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA COMPACTADA NO MUNDO: EM BREVE O BRASIL TERÁ A SUA?”, *Acta Biomédica Brasiliensia*, vol. 9, no 1, p. 17, abr. 2018, doi: 10.18571/acbm.153.
- [9] L. H. Oliveira, P. V. G. Barbosa, P. A. F. Lima, F. M. Yamaji, e C. R. Sette Júnior, “Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes”, *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 40, no 3, p. 683–691, set. 2017, doi: 10.19084/rca17010.
- [10] D. Pereira da Silva, M. Alexandre Contri, S. Custodio de Faria, e S. Lúcia de Moraes, “Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética”, *Revista Ipt Tecnologia E Inovação*, vol. 5, no 16, p. 6–37, 2021, doi: 10.34033/2526-5830-v5n16-1.

Efecto de la disponibilidad de agua sobre la producción de biogás de híbridos de sorgo de madurez contrastante

Water availability effect on biogas production of sorghum hybrids with contrasting maturity

Elisa Erbetta

Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible (INTA-
CONICET), Balcarce. Argentina

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina

erbetta.elisa@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-1654-2571>

Diego Mathier

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Manfredi. Argentina

mathier.diego@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-7838-2905>

Marcos Bragachini

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Manfredi. Argentina

bragachini.marcos@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0003-2383-3606>



Nadia Gabbanelli

Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible (INTA-CONICET), Balcarce. Argentina

Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Mar del Plata.

gabbanelli.nadia@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-2360-0549>

Laura Echarte

Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible (INTA-CONICET), Balcarce. Argentina

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.

echarte.laura@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-5190-8110>

María Mercedes Echarte

Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible (INTA-CONICET), Balcarce. Argentina

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.

echarte.maria@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-1551-6072>

Resumen

La bioenergía enfrenta el desafío de mitigar el cambio climático mediante la sustitución de combustibles fósiles utilizando biomasa generada con el menor uso de recursos hídricos posible. El objetivo es evaluar el efecto de la disponibilidad de agua sobre el rendimiento de biomasa y su conversión en biogás de distintos genotipos de sorgo contrastantes en el largo de ciclo. Se realizaron ensayos que incluyeron la combinación de (i) híbridos de madurez contrastante (fotosensitivos y doble propósito), (ii) regímenes hídricos (RH; riego y seco) y (iii) localidades (Balcarce- Bs.As. y Manfredi-Córdoba). Se determinaron variables agronómicas, parámetros cinéticos de producción de biogás, composición del biogás y

rendimiento potencial de metano por unidad de superficie (R_{metano}). El RH afectó el rendimiento de biomasa total y altura únicamente en híbridos fotosensitivos. El potencial de producción de biogás no fue afectado por el RH, pero si la tasa máxima de producción de biogás y el tiempo para la alcanzar k_{max} . El contenido de metano del biogás no fue afectado por ninguno de los factores analizados, siendo en promedio 53,6%. El RH afectó únicamente el R_{metano} en híbridos fotosensitivos. Si bien la convertibilidad de la biomasa de sorgo a biogás es relativamente estable ante cambios en la disponibilidad de agua durante estadios de crecimiento vegetativos, condiciones de baja disponibilidad de agua podrían afectar R_{metano} en caso de optar por la utilización de híbridos de sorgo fotosensitivos para la producción de biomasa.

Palabras clave

Régimen hídrico; Déficit hídrico; Biomasa; Cultivo energético; Digestión anaerobia

Abstract

In a context of climate change, bioenergy faces a double challenge: to mitigate climate change by replacing fossil fuels and to use biomass generated with the least possible use of water resources. The objective is to evaluate water availability effect on biomass yield and biomass conversion into biogas of different sorghum genotypes with contrasting maturity. Field trials carried out included the combination of (i) hybrids of contrasting growth cycle length (photosensitive and dual purpose), (ii) water regimes (WR; irrigation and rainfed) and iii) sites (Balcarce-Bs.As. and Manfredi-Córdoba). Agronomic variables, biogas production kinetic parameters, biogas composition and potential methane yield per surface unit (R_{methane}) were determined. WR affected total biomass yield and plant height only in photosensitive hybrids. The biogas production potential was not affected by WR, but indeed the maximum rate of biogas production and the time to reach k_{max} . The methane content of the biogas was not affected by any of the factors analyzed, being on average 53.6%. WR affected only R_{methane} in photosensitive hybrids. Although the convertibility of sorghum



biomass to biogas would be relatively stable in the face of changes in water availability during vegetative growth stages, conditions of low water availability could affect R_{methane} when using photosensitive sorghum hybrids for biomass production.

Keywords

Water regime; Water deficit; Biomass; Energy crop; Anaerobic Digestion

Introducción

La reducción en la oferta de agua constituye una de las principales limitaciones para la producción de biomasa de los cultivos a escala global [1]. El stress hídrico provoca cambios morfo-fisiológicos, anatómicos y moleculares en las plantas tales como inhibición de la germinación y crecimiento vegetativo, así como disminución de la acumulación de biomasa, y cambios en la partición e índice de cosecha [2]. En un contexto de cambio climático, donde se anticipa un aumento en la frecuencia de eventos de sequía, la bioenergía enfrenta el desafío de mitigar el cambio climático mediante la sustitución de combustibles fósiles produciendo biomasa con el menor uso de recursos hídricos posibles.

El cultivo de sorgo se caracteriza por su bajo requerimiento hídrico, el cual se encuentra en el rango de 450-650 mm dependiendo de la longitud del ciclo del cultivo [3]. Pese a su alta tolerancia al stress hídrico, este puede afectar tanto el crecimiento como el desarrollo del cultivo, disminuyendo el rendimiento y la calidad de la biomasa [4,5]. Los estadios de desarrollo reproductivo (desarrollo de la panoja, floración y llenado de granos) son más sensibles a stress hídrico en comparación con estadios de desarrollo vegetativos [6]. Por lo tanto, sería esperable que híbridos de sorgo de ciclo corto y con alta partición de biomasa a estructuras reproductivas (híbridos graníferos o doble propósito), sean más susceptibles a una disminución de la oferta de agua que híbridos de ciclo largo de floración tardía (híbridos fotosensitivos).

Estudios previos han reportado una reducción en el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en los tallos de sorgo cultivados en condiciones de agua limitante [7], lo cual podría favorecer los procesos de conversión de biomasa a bioenergía. Sin embargo, la relación entre la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo de sorgo y el potencial de producción de biogás no ha sido previamente explorada. El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar el efecto de la disponibilidad de agua sobre el rendimiento de biomasa, la cinética de producción de biogás y el rendimiento de biogás por unidad de superficie de distintos genotipos de sorgo contrastantes en el largo de ciclo.

Materiales y métodos

Se realizaron ensayos a campo durante la campaña 2020/2021 que incluyeron la combinación de (i) híbridos de sorgo de madurez contrastante: doble propósito (VDH 422 y TOB78DP) y fotosensitivos (ADV 2010 y Nucover 300); (ii) dos regímenes hídricos (riego y seco); y (iii) dos localidades (Balcarce-Buenos Aires, Argentina y Manfredi-Córdoba, Argentina). El diseño utilizado en el experimento fue parcelas divididas con tres repeticiones, donde el régimen hídrico se asignó a la parcela principal mientras que los híbridos fueron asignados a las sub-parcelas. Las parcelas principales fueron separadas por una bordura de 6 surcos de ancho. Cada unidad experimental constó de 6 surcos de ancho y 10 m de largo, distanciados 0,52 m entre sí. La densidad de plantas utilizada fue de 170000 plantas por ha en híbridos doble propósito y 110000 plantas por ha en híbridos fotosensitivos.

En el tratamiento de seco, se permitió que la dinámica de agua en el suelo siga la que ocurre naturalmente en la región; en general el agua disponible (aquella almacenada en el suelo más la proveniente de precipitación) no alcanza a cubrir los requerimientos de agua de los cultivos de verano en los momentos de mayor demanda (meses de diciembre, enero y febrero) [8]. El tratamiento de riego se realizó por goteo y se cuantificó la lámina de agua



agregada (mm); permitiendo que la reposición del agua en el suelo cubra los requerimientos de evapotranspiración máxima del cultivo de sorgo. Los híbridos se sembraron en la fecha recomendada para cada zona, se fertilizó con fósforo en forma de fosfato diamónico a la siembra y con nitrógeno aplicado en forma de urea al voleo cuando el cultivo presentó la diferenciación del ápice (estadio 3; [9]). Se controló la presencia de malezas en preemergencia con 2 litros por hectárea de glifosato y a lo largo del ciclo del cultivo de forma manual.

La cosecha se realizó en los 2 surcos centrales de cada unidad experimental, en el estadio de grano pastoso-duro en los híbridos doble propósito o en el momento en que la biomasa presentó entre un 30-35 % de materia seca en los híbridos fotosensitivos. Se cortó al ras del suelo 10 plantas consecutivas, se identificó el número total de tallos y se separaron en sus componentes (tallos, hojas, panojas). La altura de la planta se determinó en el tallo principal midiendo desde la base del tallo hasta el extremo distal de la panoja. Cada muestra se secó en estufa a 60°C hasta peso constante y se pesó para determinar el rendimiento de biomasa aérea y de las fracciones anatómicas en base seca.

El potencial bioquímico de producción de biogás fue determinado de acuerdo a la metodología descrita en [10] y el contenido de metano del biogás fue estimado mediante adsorción en NaOH 1N. El volumen normalizado de biogás por g de sólido volátil (SV) de cada muestra fue graficado en forma acumulada y la producción potencial de biogás se ajustó a un modelo de Gompertz modificado (Ec 1 y 2; [11]) mediante el programa Sigmaplot v 11.

$$B = P_{bio} \exp\left\{-\exp\left[\frac{k_{max} x e}{P_{bio}}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (1)$$

$$tk_{max} = \frac{P_{bio}}{k_{max}} + \lambda \quad (2)$$

Donde B es la producción de biogás acumulado (ml g SV⁻¹), P_{bio} es el potencial de producción de biogás al final del tiempo de incubación (ml g SV⁻¹), k_{max} es la tasa máxima de

producción de biogás ($\text{ml g SV}^{-1} \text{ día}^{-1}$), λ es la fase lag o tiempo sin producción de biogás (días), t es tiempo de incubación (días) y $t_{k_{\max}}$ es el tiempo a la tasa máxima de producción de biogás (días).

El rendimiento potencial de metano (R_{metano}) por unidad de superficie fue calculado como el producto entre los sólidos volátiles por hectárea, P_{bio} y el contenido de metano del biogás. La información obtenida de los ensayos a campo fue analizada mediante un ANOVA considerando como factores los híbridos evaluados, el régimen hídrico (riego o seco) y la interacción entre ambos factores. Las variables agronómicas analizadas fueron rendimiento de biomasa total en base seca, altura y proporción de fracciones anatómicas (tallos, hojas y panojas), mientras que las variables de producción de biogás analizadas fueron los parámetros cinéticos de producción de biogás (P_{bio} , k_{\max} , λ y $t_{k_{\max}}$), composición de biogás y R_{metano} . La comparación de medias de los híbridos para las variables descriptas se realizó mediante un test de Tukey con un 5% de confianza. Para todos los análisis estadísticos descriptos se utilizó el programa Infostat.

Resultados

En la localidad de Balcarce, los tratamientos de seco y riego estuvieron provistos por 391,1 mm y 529,4 mm de agua respectivamente, mientras que en la localidad de Manfredi 439,8 mm y 574,4 mm (Cuadro 1). En ambas localidades se observaron síntomas de stress hídrico únicamente en las plantas cultivadas en seco en los meses de diciembre y enero, correspondiente a estadios de desarrollo vegetativo. Estadios de desarrollo reproductivo fueron acompañados de precipitaciones en ambas localidades por lo que el tratamiento de seco no disminuyó la disponibilidad de agua en estos estadios fenológicos para los híbridos doble propósito.



En ambas localidades, el híbrido fotosensitivo ADV 2010 se destacó por presentar mayor rendimiento de biomasa total ($p=0,0013$ y $p=0,0075$ para Balcarce y Manfredi respectivamente), altura ($p<0,0001$ en ambas localidades) y % de tallo ($p=0,001$ y $p<0,0001$ para Balcarce y Manfredi respectivamente) que los restantes híbridos (Cuadro 2).

Cuadro 1. Lámina de agua (mm) mensual y total provista por precipitaciones y riego en las localidades de Balcarce y Manfredi.

Mes	Balcarce		Manfredi	
	Precipitaciones (mm)	Riego (mm)	Precipitaciones (mm)	Riego (mm)
<i>Noviembre</i>	-	-	22,3	0
<i>Diciembre</i>	30,1	0	132,3	1,8
<i>Enero</i>	64,5	41,6	156,3	77,5
<i>Febrero</i>	97,0	55,0	54,8	28,5
<i>Marzo</i>	73,5	41,8	74,2	26,8
<i>Abril</i>	112,5	0	-	-
<i>Mayo</i>	13,5	0	-	-
Total	391,1	138,3	439,8	134,6

El RH presentó un efecto significativo sobre el rendimiento de biomasa total únicamente en el híbrido ADV 2010 y en ambas localidades ($p=0,0180$ y $p=0,0271$ para Balcarce y Manfredi respectivamente), mientras que la altura fue afectada por el RH únicamente en la localidad de Balcarce y en híbridos fotosensitivos ($p=0,0042$). El RH no afectó la proporción de las fracciones anatómicas tallos y hojas en ninguno de los híbridos. En contraste, la proporción de panojas fue afectada por el RH en híbridos doble propósito, siendo mayor en híbridos cultivados en secano (Cuadro 2; VDH 422 en ambas localidades y TOB78DP en Manfredi).

Cuadro 2. Rendimiento en base seca, altura y proporción de las fracciones anatómicas (tallos, hoja y panoja) de híbridos de sorgo fotosensitivos y doble propósito cultivados bajo regímenes hídricos contrastantes en las localidades de Balcarce y Manfredi

Localidad	Híbrido	Régimen hídrico	Rendimiento biomasa total (Mg MS ha ⁻¹)	Altura (m)	Tallo (%)	Hoja (%)	Panoja (%)
Balcarce	ADV 2010	Secano	23,37 b	3,34 b	79,27 a	17,06 b	3,67 d
		Riego	39,25 a	4,10 a	81,40 a	16,20 b	2,40 d
	NUCOVER 300	Secano	17,07 b	3,05 b	74,60 a	11,61 c	13,79 c
		Riego	25,56 b	3,85 a	75,77 a	11,22 c	13,02 c
	TOB78DP	Secano	16,03 b	1,57 c	48,26 b	16,09 b	35,66 a
		Riego	17,69 b	1,82 c	50,11 b	16,15 b	33,75 a
	VDH 422	Secano	16,88 b	1,47 c	47,55 b	20,38 a	32,07 a
		Riego	14,60 b	1,52 c	52,00 b	21,29 a	26,71 b
Manfredi	ADV 2010	Secano	26,48 b	4,39 a	82,02 a	14,26 ab	3,73 d
		Riego	40,14 a	4,81 a	84,94 a	15,06 ab	0,00 e
	NUCOVER 300	Secano	24,11 b	5,01 a	81,05 a	11,85 b	7,11 c
		Riego	28,36 ab	5,22 a	78,36 ab	13,98 b	7,66 c
	TOB78DP	Secano	24,48 b	2,55 b	59,23 b	14,49 ab	26,29 a
		Riego	22,46 b	3,11 b	62,35 b	15,89 ab	21,76 b
	VDH 422	Secano	21,81 b	2,75 b	58,73 b	16,90 a	24,35 a
		Riego	25,05 b	2,80 b	61,24 b	17,14 a	21,63 b

En la localidad de Balcarce, el híbrido TOB 78DP se destacó por presentar mayor Pbio, seguido del híbrido ADV 2010 ($p=0,008$), mientras que en Manfredi los híbridos doble propósito TOB78DP y VDH 422 presentaron mayor Pbio que los híbridos fotosensitivos Nucover 300 y ADV 2010 ($p=0,0013$). No se observó un efecto significativo del RH ($p>0,05$) sobre Pbio independientemente del híbrido y la localidad (Cuadro 3). k_{max} fue significativamente mayor en híbridos doble propósito que fotosensitivos en ambas localidades ($p=0,0017$ y $p<0,0001$ en Balcarce y Manfredi respectivamente). El RH afectó el



k_{max} únicamente en el híbrido VDH 422 cultivado en Balcarce, ya que plantas cultivadas en seco presentaron mayor k_{max} que plantas cultivadas con riego ($p=0,0385$). No se observó la existencia de fase lag (λ) en ningún tratamiento ni localidad. Híbridos doble propósito presentaron menor t_{kmax} que híbridos fotosensitivos en ambas localidades ($p=0,0066$ y $p<0,0001$ en Balcarce y Manfredi respectivamente). El RH afectó t_{kmax} dependiendo del híbrido considerado y la localidad: en Balcarce el híbrido TOB 78DP presentó mayor t_{kmax} cuando fue cultivado con riego, mientras que el efecto contrario fue observado en Manfredi con el híbrido ADV 2010.

Cuadro 3. Parámetros cinéticos de producción de biogás, % de metano del biogás y rendimiento de metano de híbridos de sorgo fotosensitivos y doble propósito cultivados en regímenes hídricos contrastantes en las localidades de Balcarce y Manfredi

Localidad	Híbrido	Régimen hídrico	Pbio (ml _N g SV ⁻¹)	k_{max} (ml _N g SV ⁻¹ día ⁻¹)	t_{kmax} (día)	Metano (%)	R _{metano} (m ³ ha ⁻¹)
Balcarce	ADV 2010	Secano	376,71 ab	32,48 b	11,75 ab	52,67 a	4297,34 b
		Riego	397,00 ab	42,33 b	10,35 ab	55,73 a	9439,92 a
	NUCOVER 300	Secano	368,59 b	38,29 b	10,68 a	53,46 a	3149,85 b
		Riego	359,22 b	29,02 b	12,93 a	52,41 a	4451,52 b
	TOB78DP	Secano	403,37 a	54,28 a	7,65 c	52,94 a	3178,63 b
		Riego	403,87 a	64,65 a	6,25 c	53,20 a	3518,32 b
	VDH 422	Secano	374,78 b	55,69 a	6,79 c	52,94 a	3078,77 b
		Riego	355,05 b	41,33 b	8,61 b	52,94 a	2488,21 b
Manfredi	ADV 2010	Secano	402,42 ab	35,73 b	11,28 a	52,78 a	5812,58 a
		Riego	366,48 b	35,66 b	10,28 b	55,09 a	6930,69 a

	NUCOVER 300	Secano	384,04 b	35,37 b	10,86 ab	53,47 a	4608,30 a
		Riego	386,76 b	34,57 b	11,19 ab	54,40 a	5562,25 a
	TOB78DP	Secano	446,82 a	52,67 a	8,53 c	52,31 ab	5227,82 a
		Riego	411,80 a	47,90 a	8,61 c	54,40 a	4529,02 a
	VDH 422	Secano	410,73 a	45,99 a	8,94 c	53,94 a	4443,00 a
		Riego	423,17 a	52,79 a	8,05 c	54,86 a	5388,99 a

El porcentaje de metano del biogás no fue afectado por ninguno de los factores analizados siendo en promedio 53,55%. En la localidad de Balcarce, los híbridos se diferenciaron en su R_{metano} ($p < 0,0001$), siendo el híbrido ADV 2010 el que se destacó por presentar mayor valor de esta variable, mientras que los híbridos restantes no se diferenciaron entre sí y presentaron un R_{metano} promedio de $3336 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En Manfredi en cambio, no se observó una diferencia significativa entre híbridos, los cuales presentaron un R_{metano} promedio de $5534 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. El RH únicamente afectó el R_{metano} del híbrido ADV 2010 cultivado en Balcarce, donde el tratamiento de secano disminuyó el R_{metano} en comparación con el tratamiento de riego ($p = 0,006$) (Cuadro 3).

Conclusiones y/o recomendaciones

La disponibilidad de agua en estadios vegetativos tempranos redujo el rendimiento de biomasa total y altura únicamente en el híbrido fotosensitivo de mayor duración de ciclo (ADV 2010, Cuadro 2). Este resultado concuerda con estudios previos que asocian una menor capacidad de recuperación del crecimiento ante un periodo de déficit hídrico en genotipos de sorgo de mayor duración de ciclo de cultivo [12]. En este sentido, la utilización de híbridos de sorgo doble propósito de menor longitud de ciclo podría ofrecer la ventaja



de proporcionar mayor estabilidad en el rendimiento de biomasa en condiciones de ocurrencia de déficit hídrico en estadios vegetativos tempranos, tales como las evaluadas en este trabajo de investigación. De acuerdo con estudios previos, el Pbio de un genotipo de sorgo se relaciona con el aporte de almidón desde los granos, es decir, con la proporción de panojas con respecto a la biomasa total [13]. En acuerdo con ello, se observó que híbridos con % de panojas (híbridos doble propósito) presentaron en general mayor Pbio que híbridos fotosensitivos. Sin embargo, el híbrido ADV 2010 también se destacó por presentar altos valores de Pbio, lo cual indica que es posible obtener altos valores de Pbio utilizando híbridos fotosensitivos. Estudios previos indican que, en ausencia de granos, el contenido de azúcares solubles constituye el principal factor que influye sobre el potencial de producción de biogás de la biomasa de sorgo [14]. Por lo tanto, el mayor potencial de producción de biogás observado en este híbrido puede estar relacionado con su alta capacidad de almacenamiento de azúcares en los tallos, dada por la presencia del trait tallo dulce [15].

El RH no afectó significativamente el Pbio de ninguno de los híbridos de sorgo evaluados, lo cual sugiere que la convertibilidad de la biomasa de sorgo a biogás sería relativamente estable ante cambios en la disponibilidad de agua durante estadios de crecimiento vegetativos. Esto cobra vital importancia para la producción de biomasa en un contexto de cambio climático donde se espera una mayor frecuencia de eventos de stress hídrico en un futuro cercano. Sin embargo, dado que el rendimiento de biomasa es el principal factor que determina el rendimiento de bioenergía por unidad de superficie [16], se debe considerar que condiciones de baja disponibilidad de agua podrían afectar el rendimiento de metano por unidad de superficie en caso de optar por la utilización de híbridos de sorgo fotosensitivos para la producción de biomasa.

Finalmente, si bien el RH no afectó la convertibilidad de la biomasa a biogás (Pbio), cambios en las constantes cinéticas k_{max} y t_{kmax} (VDH 422, Cuadro 4) sugieren que sería posible obtener una mayor velocidad del proceso de digestión anaeróbica utilizando biomasa

cultivada en seco. En un sistema de digestión anaeróbico continuo, una mayor tasa de producción de biogás permitiría reducir el tiempo de retención hidráulico, disminuyendo el tamaño requerido de reactor y los costos operacionales [17]. Por lo tanto, contar con menor disponibilidad de agua en estadios vegetativos tempranos podría representar una ventaja en el caso de optar por la utilización de híbridos de sorgo doble propósito, dado que el R_{metano} no es afectado por el RH.

Referencias

- [1] Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A., “Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review”, *Advances in agronomy*, vol 156, pp. 109-157, 2019. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>
- [2] Hussain, S., Hussain, S., Qadir, T., Khaliq, A., Ashraf, U., Parveen, A., ... & Rafiq, M., “Drought stress in plants: An overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies”, *Plant Science Today*, vol 6 no 4, pp. 389-402, 2019. <https://doi.org/10.14719/pst.2019.6.4.578>
- [3] Chadalavada, K., Kumari, B. D., & Kumar, T. S., “Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality”, *Planta*, vol 253 no 5, pp. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03631-2>
- [4] Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T., ... & Geleta, M., “Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress”, *Planta*, vol 255 no 1, pp. 1-23, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- [5] Somegowda, V. K., Vemula, A., Naravula, J., Prasad, G., Rayaprolu, L., Rathore, A., ... & Deshpande, S. P., “Evaluation of fodder yield and fodder quality in sorghum and its interaction with grain yield under different water availability regimes”, *Current Plant Biology*, vol 25, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100191>
- [6] Prasad, V. R., Govindaraj, M., Djanaguiraman, M., Djalovic, I., Shailani, A., Rawat, N., ... & Prasad, P. V., “Drought and high temperature stress in sorghum: Physiological, genetic, and molecular insights and breeding approaches”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol 22 no 18, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22189826>
- [7] Fracasso, A., Perego, A., & Amaducci, S., “Characterisation of ten commercial sorghum genotypes grown under water-limited conditions for bioenergy production in Mediterranean environment”, *Italian Journal of Agronomy*, vol 12 no 4, pp. 302-314, 2017. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.898>
- [8] Hernández, M., Echarte, L., Della Maggiora, A., Cambareri, M., Barbieri, P., & Cerrudo, D., “Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under



- contrasting soil water availability”, *Field Crops Research*, vol 178, pp. 8-15, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.017>
- [9] Vanderlip, R. L., & Reeves, H. E., “Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor*,(L.) Moench.]”, *Agronomy journal*, vol 64 no 1, pp. 13-16, 1972.
- [10] Erbetta, E., Echarte, L., Elizagaray, C. R., Depetris, G. J., Gabbanelli, N., & Echarte, M. M., “Stover biogas potential of corn crops grown under contrasting water availability and nitrogen supply”, *Biomass and Bioenergy*, vol 145, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105943>
- [11] Gadhamshetty, V., Arudchelvam, Y., Nirmalakhandan, N., & Johnson, D. C., “Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 35 no 2, pp. 479-490, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.007>
- [12] Perrier, L., Rouan, L., Jaffuel, S., Clément-Vidal, A., Roques, S., Soutiras, A., ... & Luquet, D., “Plasticity of sorghum stem biomass accumulation in response to water deficit: a multiscale analysis from internode tissue to plant level”, *Frontiers in Plant Science*, vol 8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01516>
- [13] Windpassinger, S., Friedt, W., Frauen, M., Snowdon, R., & Wittkop, B., “Designing adapted sorghum silage types with an enhanced energy density for biogas generation in temperate Europe”, *Biomass and Bioenergy*, vol 81, pp 496-504. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.005>
- [14] Thomas, H. L., Pot, D., Jaffuel, S., Verdeil, J. L., Baptiste, C., Bonnal, L., ... & Carrère, H., “Mobilizing sorghum genetic diversity: Biochemical and histological-assisted design of a stem ideotype for biomethane production”, *GCB Bioenergy*, vol 13 no 12, pp. 1874-1893, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12886>
- [15] Murray, S. C., Sharma, A., Rooney, W. L., Klein, P. E., Mullet, J. E., Mitchell, S. E., & Kresovich, S., “Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I. QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates”, *Crop Science*, vol 48 no 6, pp. 2165-2179. 2018. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0016>
- [16] Sanford, G. R., Oates, L. G., Roley, S. S., Duncan, D. S., Jackson, R. D., Robertson, G. P., & Thelen, K. D., “Biomass production a stronger driver of cellulosic ethanol yield than biomass quality”, *Agronomy Journal*, vol 109 no 5, pp. 1911-1922, 2017. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.08.0454>
- [17] Sarker, S., Lamb, J. J., Hjelme, D. R., & Lien, K. M., “A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants”, *Applied Sciences*, vol 9 no 9. 2019. <https://doi.org/10.3390/app9091915>

Aprovechamiento de residuos de la cría de insectos (frass) como fertilizante: aplicación y beneficios

Use of insect rearing residues (frass) as fertilizer: application and benefits

Jorge Iñaki López Portas

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera
a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro, México

Correo electrónico: jorgiloposo@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5476-0273>

Valeria Caltzontzin Rabell

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera
a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro, México

Correo electrónico: valeria.caltzontzinrabell@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5739-0957>

Claudia Gutiérrez Antonio

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera
a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro, México

Correo electrónico: claugtez@gmail.com

ORCID: [0000-0002-7557-2471](https://orcid.org/0000-0002-7557-2471)



Resumen

Para el año 2025, se espera que la generación de residuos sólidos municipales sea de alrededor de 2,200 millones de toneladas, las cuales representan un problema que aumenta de manera constante. Desde el punto de vista ambiental, cuando estos residuos no se tratan de manera correcta, son vertidos en los rellenos sanitarios y se descomponen de manera incontrolada, lo que contamina el ambiente. Además, desde el punto de vista económico, su manejo requiere un importante uso de recursos. Un proceso explorado para el tratamiento de estos residuos es la cría de insectos; este tratamiento resulta interesante debido a que permite procesar diversos residuos y convertirlos en productos como proteína, lípidos o frass. De manera particular, el frass es un residuo que se obtiene después de separar los insectos del sustrato donde crecieron; el frass es una mezcla compuesta de excretas, exoesqueletos y residuos del sustrato, y se ha reportado que contiene un elevado contenido de nitrógeno y fósforo. Por otra parte, la agricultura depende del uso de fertilizantes sintéticos, los cuales no son considerados viables ya que contienen recursos finitos como el fósforo, pueden contaminar mantos acuíferos o, inclusive, afectar la salud. Así, en el presente trabajo se revisaron diversos artículos científicos en los cuales se ha reportado el uso de frass como un fertilizante, resaltando los resultados obtenidos y comparando los diversos sustratos utilizados. La propuesta de utilizar el frass como fertilizante representa una estrategia sustentable para incorporar los residuos orgánicos nuevamente en la cadena de producción, y con ello contribuir a la economía circular.

Palabras clave

Residuos orgánicos, frass, economía circular, fertilizante orgánico, cría de insectos

Abstract

By 2025, the generation of municipal solid waste is expected to be around 2.2 billion tons, which represents a steadily increasing problem. From the environmental point of view, when this waste is not treated correctly, it is dumped in landfills and decomposes in an

uncontrolled manner, contaminating the environment. In addition, from an economic point of view, its management requires a significant use of resources. One process that has been explored for treating this waste is insect farming; this treatment is interesting because it makes it possible to process various wastes and convert them into products such as protein, lipids, or frass. Frass is a residue obtained after separating the insects from the substrate where they grew; it is a mixture composed of excreta, exoskeletons, and substrate residues and has been reported to contain a high content of nitrogen and phosphorus. On the other hand, agriculture depends on the use of synthetic fertilizers, which are not considered viable because they contain finite resources such as phosphorus, which can contaminate aquifers or affect health. Thus, in the present work, several scientific articles were reviewed in which the use of frass as a fertilizer has been reported, highlighting the results obtained and comparing the different substrates used. The proposal to use frass as a fertilizer represents a sustainable strategy to incorporate organic waste back into the production chain, thus contributing to the circular economy.

Keywords

Organic waste, frass, circular economy, organic fertilizer, insect rearing

Introducción

Para el año 2025, se espera que la generación de residuos sólidos municipales sea de alrededor de 2,200 millones de toneladas. Estos residuos están compuestos en su mayoría por compuestos orgánicos (50%) y una mezcla de plásticos, metales, papel y vidrio [1]. Se estima que 1,300 millones de toneladas de residuos orgánicos son generadas y desechadas anualmente. Debido al manejo que requieren, desde un punto de vista económico, dicha cantidad de residuos representa aproximadamente 900 mil millones de dólares [2]. Desde un punto de vista ambiental, cuando son desechados, estos residuos son normalmente incinerados, lo cual genera gases peligrosos. Por otra parte, cuando estos residuos son vertidos o enterrados, se descomponen en condiciones antihigiénicas; estas condiciones



promueven la emisión de gases de efecto invernadero y la filtración de lixiviados contaminantes en aguas subterráneas. Además, esta situación conlleva un problema de salud ya que atraen vectores patógenos, como roedores o algunos insectos, los cuales pueden propagar enfermedades [3][4]. No obstante, los problemas descritos representan oportunidades perdidas para aumentar los beneficios medioambientales y socioeconómicos [5]. Los residuos orgánicos están compuestos principalmente por carbohidratos, proteínas, lípidos y compuestos bioactivos, los cuales pueden explotarse para producir energía, antioxidantes, entre otros [6] y con ello, promover la economía circular [2].

Por ello, y debido a su constante generación e incremento, en el presente trabajo se revisan, en la sección I, las estrategias propuestas para su tratamiento, resaltando el uso de insectos y los productos que pueden obtenerse, entre ellos, un fertilizante. En la sección II se aborda la problemática actual de los fertilizantes en la agricultura, así como la búsqueda de alternativas sustentables. En la sección III se revisan diversos artículos que abordan la biotransformación de residuos orgánicos en fertilizantes a través de la cría de insectos, así como los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección IV se mencionan las perspectivas de la presente revisión.

I. Procesamiento de residuos orgánicos

Entre los diversos procesos para valorizar los residuos orgánicos se encuentran los procesos termoquímicos, químicos, bioquímicos y biológicos [7]. Los procesos termoquímicos utilizan calor para transformar químicamente la biomasa en energía o productos intermedios. En ellos se incluyen: la licuefacción hidrotermal, carbonización hidrotermal, pirólisis, torrefacción, gasificación y combustión (Cuadro 1).

Cuadro 1. Procesos termoquímicos utilizados para valorizar residuos orgánicos.

Proceso	Descripción	Productos	Ventajas	Desventajas
---------	-------------	-----------	----------	-------------

<p>Licuefacción hidrotermal</p>	<p>El agua actúa como catalizador y convierte, mediante reacciones de isomerización, despolimerización y repolimerización, biomoléculas como proteínas o lípidos en biocombustibles.</p>	<p>Biocombustible líquido</p>	<p>-Utiliza biomasa húmeda. - Biocombustible es comparable al petróleo crudo.</p>	<p>-Requiere condiciones supercríticas (250-370 °C). -Rendimiento varía dependiendo composición de biomasa, temperatura y tiempo. -Requiere un procesamiento final</p>
<p>Carbonización hidrotermal</p>	<p>Se llevan a cabo reacciones de hidrólisis, condensación y descarboxilación.</p>	<p>Biocombustible sólido de alta densidad y energía (hidrocarbón)</p>	<p>-Utiliza biomasa húmeda. -Tiempo de retención menor a 1 h</p>	<p>Requiere temperaturas entre 180-250 °C y presiones entre 2MPa y 10 MPa.</p>
<p>Pirólisis</p>	<p>Las biomoléculas se craquean y despolimerizan debido al</p>	<p>Bioaceite, carbón y gases no condensables</p>	<p>Requiere presión atmosférica.</p>	<p>-Requiere atmósfera inerte. -Condiciones entre 400 y 600 °C. -Se ve afectado por la composición de la</p>



	calentamiento constante.			biomasa, tasa de calentamiento, reactor, entre otros.
Torrefacción	Proceso de pretratamiento con el que se retira humedad	Carbón con mayor densidad energética	Mejora la densidad energética del biocombustible.	-Requiere biomasa seca. -Temperatura entre 200 y 300 °C -Requiere atmósfera libre de oxígeno
Gasificación	Las biomoléculas se descomponen en pequeñas moléculas gaseosas.	Hidrógeno, monóxido de carbono y metano (syngas)	Puede utilizar biomasa seca o húmeda dependiendo o método de gasificación.	Temperaturas entre 800 y 1000 °C con presiones de 1 a 10 bar
Combustión	Completa oxidación de la biomasa	Vapor, dióxido de carbono y agua	No requiere equipos especiales	-Temperatura entre 700 y 1400 °C. -Requiere biomasa seca o con menos del 50% de humedad.

Fuentes: [7] [8].

Entre los procesos químicos se encuentra la transesterificación, la cual consiste en la conversión de triglicéridos en cadenas largas de ésteres alquílicos de ácidos grasos. Los productos que se obtienen son el biodiesel y glicerol. Algunas desventajas que presenta es que requiere la presencia de un alcohol y catalizador; además el rendimiento depende de

la temperatura, tiempo, proporción alcohol-lípidos, entre otros [8]. Los procesos bioquímicos utilizan bacterias, microorganismos o enzimas para descomponer la biomasa en biocombustibles y productos; entre ellos se incluyen: la fermentación alcohólica y la digestión anaeróbica [9] (Cuadro 2).

Cuadro 2. Procesos bioquímicos utilizados para valorizar residuos orgánicos.

Proceso	Descripción	Productos	Ventajas	Desventajas
Fermentación alcohólica	Proceso anaeróbico donde microorganismos hidrolizan y fermentan polisacáridos (almidón, celulosa)	Bioetanol y dióxido de carbono	Se puede obtener bioetanol con 95% de pureza.	-Biomasa requiere pretratamiento para obtener azúcares simples. -Bioetanol requiere una destilación posterior.
Digestión anaeróbica	Utiliza reacciones de hidrólisis (compuestos orgánicos insolubles), acidogénesis (por medio de bacterias acidogénicas), acetogénesis (por medio de bacterias acetogénicas), y metanogénesis (por	Biogás (60% metano y 40% dióxido de carbono) y digestato (usado como fertilizante)	Biogás se puede quemar de manera directa	Rendimiento de productos depende de productos generados en la fase anterior.



	medio de bacterias metanogénicas). El producto de una fase de utiliza en la siguiente.			
--	--	--	--	--

Fuentes: [7][8][9].

Los procesos descritos se utilizan de manera convencional; sin embargo, su eficiencia aún es cuestionable. Debido a la enorme generación de residuos, el costo de inversión, transporte y operación, se requiere un avance importante en el desarrollo e investigación de dichos procesos [6]. En este sentido, los procesos biológicos, los cuales incluyen el tratamiento con organismos vivos, como microalgas, hongos e insectos, proveen una alternativa para acelerar la descomposición de la materia [10] (Cuadro 3). Los procesos biológicos son los únicos amigables con el ambiente [11].

Cuadro 3. Procesos biológicos utilizados para valorizar residuos orgánicos.

Proceso	Descripción	Productos	Ventajas	Desventajas
Tratamiento con microalgas	Crecimiento de microalgas en efluentes con nutrientes.	Lípidos, carbohidratos, proteínas.	-Alta eficiencia -Absorción de dióxido de carbono -Tiempos de conversión bajos	-Difícil escalamiento -Fácil contaminación
Tratamiento con hongos	Crecimiento de hongos en residuos orgánicos	Biomasa de hongos (proteína)	-Requiere bajo costo y energía -Degradan diversos residuos	-Difícil escalamiento -Bioconversión lenta

				-Fácil contaminación
Tratamiento con insectos	Crecimiento de insectos en residuos orgánicos	Proteína, lípidos, frass (usado como fertilizante)	-Requiere bajo costo y energía -Degradan diversos residuos -Tiempos de conversión bajos	-Difícil escalamiento -Fácil contaminación

Fuentes: [10] [11] [12] [13].

Como se muestra en el Cuadro 3, entre los diversos productos que se pueden obtener del tratamiento con insectos se encuentra el frass. El frass es un residuo que se obtiene después de separar los insectos del sustrato donde crecieron y del cual se alimentaron; el frass es una mezcla compuesta de excretas, exoesqueletos y residuos del sustrato. Se ha reportado que contiene un elevado contenido de nitrógeno y fósforo, por lo que se ha propuesto como alternativa a los fertilizantes comerciales [13] [14] [15].

II. Fertilizantes y agricultura

La población humana crece rápidamente, lo que conlleva a una mayor producción por parte de la agricultura y la ganadería para asegurar el alimento de miles de millones de personas. Entre los retos que esto presenta, el espacio es cada vez menor, además de que los métodos utilizados deben ser sustentables; lo anterior debido a la situación actual del medio ambiente, así como al estado crítico en que se encuentran los recursos [16].

En 2017 se realizó un estudio sobre la situación de la agricultura en México en el que se destaca que la superficie destinada a la agricultura ha incrementado muy poco, en



comparación al crecimiento de la población mexicana. Por ello, es necesario el aumento del rendimiento por unidad de superficie como una estrategia para asegurar la producción alimentaria. Los autores concluyen que, en el año 2050, el espacio cultivable disponible no será suficiente, por lo que se debe aumentar el rendimiento de los sistemas productivos del país [17]. Los sistemas de producción se ven afectados por el cambio climático y una creciente escasez de recursos disponibles, principalmente a causa de las inundaciones y los patógenos que éstas provocan. Además, la búsqueda por aumentar el rendimiento ha creado un sobreuso de fertilizantes y agroquímicos[18].

Los agroquímicos aumentan la productividad durante los primeros años de aplicación; sin embargo, tienen un efecto nocivo sobre la salud y el medio ambiente [19]. Los suelos fértiles requieren de un balance en el que intervienen nutrientes y factores químicos como el pH y microorganismos (bacterias y hongos principalmente). A pesar de esto, los únicos componentes que se aportan mediante fertilizantes químicos principalmente son nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), sin tomar en cuenta el desbalance que éstos puedan causar en el suelo [16].

El nitrógeno es uno de los componentes de mayor importancia para la agricultura; sin embargo, tiene una baja eficiencia durante su aplicación, ya que suele filtrarse rápidamente a los mantos acuíferos y no es aprovechado en los cultivos. Esto provoca pérdidas económicas al elevar la inversión en insumos agrícolas [18], problemas de salud, como diversos cánceres o la metahemoglobinemia, y daños ambientales como el crecimiento de algas superficiales (eutrofización) las cuales crean zonas donde no se puede desarrollar vida a causa de la falta de oxígeno [16]. Para mitigar esta problemática, se han propuesto fertilizantes de eficiencia mejorada, los cuales utilizan nanotecnología que busca encapsular, recubrir o generar una liberación lenta o controlada del nitrógeno, mejorando su eficiencia. A pesar de esto no se ha conseguido aún mejorar significativamente el rendimiento y disminuir su impacto [18].

Además de los fertilizantes, se utilizan plaguicidas para eliminar insectos no deseados o malezas, que puedan deteriorar la salud y rendimiento de una producción agrícola. La mayoría de éstos tienden a ser bioacumulables, por lo que en varios países desarrollados se ha prohibido su uso debido a sus efectos sobre la salud humana y sobre el medio ambiente. Un manejo integral de plagas y el uso de alternativas como la agricultura protegida, bioplaguicidas y biofertilizantes pueden mitigar el uso de estos compuestos químicos [16]. Ante esta problemática, se ha comenzado a evaluar el uso de residuos orgánicos, estiércoles y aguas tratadas; sin embargo, éstos deben pasar por un análisis previo, ya que, sin un buen control, son una fuente potencial de contaminación de metales pesados y patógenos [18]. En particular, los residuos orgánicos resultan de interés ya que pueden ser convertidos en nuevas materias primas. Esta conversión se puede realizar mediante procesos químicos, físicos y biológicos. Algunos de los productos que pueden generarse incluyen fertilizantes de origen orgánico, los cuales tienen la capacidad de restaurar suelos desgastados [20]. A continuación, se exponen tres métodos para la obtención de biofertilizantes (Cuadro 4).

Cuadro 4. Métodos de procesado para obtención de biofertilizantes

Métodos	Descripción	Ventajas	Desventajas
Bocashi	Consiste en la fermentación aeróbica de materia orgánica con microorganismos propios del residuo en cantidades controladas	Los microelementos se encuentran de forma soluble y con un pH favorable para la absorción radicular (6.5 a 7.0)	La velocidad de descomposición y el aporte nutrimental depende de la composición de la mezcla de residuos



Lombri composta	Uso de lombrices para la degradación de la materia orgánica	El proceso de compostaje es más rápido que otros métodos, además de obtener resultados muy similares	El proceso sólo es rápido para materias de origen vegetal en crudo, cáscaras y tallos, ya que otros residuos requieren más tiempo para la degradación
Microbiano	Se utilizan microorganismos y un control de la temperatura	No se menciona	Se producen grandes cantidades de CO ₂ en el proceso, y se debe colocar un sistema que permita oxigenar la mezcla a compostar

Fuente: [20].

La mayoría de los autores concuerdan en que se deben desarrollar nuevas alternativas al uso de agroquímicos, sin sacrificar rendimiento en el proceso. Los biofertilizantes mencionados son de degradación lenta, y difíciles de producir en masa, ya que deben de pasar por cierto control biológico en comparación con los fertilizantes de origen químico. Por ello, en los últimos años se han desarrollado técnicas que utilizan insectos para transformar residuos en productos aprovechables, como lo son alimentos tanto para animales como para el ser humano. Del proceso de cría de insectos se obtiene un residuo, resultado de la excreta de los insectos (frass), el cual se ha comenzado a estudiar recientemente como un fertilizante orgánico alternativo en la agricultura [21].

III. Aprovechamiento de residuos de la cría de insectos (frass) como fertilizante

El uso de insectos para bioconvertir residuos orgánicos puede reducir la contaminación que este desecho genera, y así devolver los nutrientes al suelo agrícola. Como resultado de este cultivo se obtiene biomasa, que puede convertirse en otros productos, y frass. Además, el cultivo de insectos requiere un menor tiempo (5 semanas) para degradar los residuos

orgánicos, en comparación con el compostaje convencional (8-24 semanas) [22]. A continuación, se presentan diversos estudios en los cuales se ha reportado la aplicación y efecto del frass de insectos en cultivos agrícolas.

Frass de gusano de la harina: tenebrio (*Tenebrio molitor*)

El gusano de la harina es un insecto que se ha estudiado intensivamente debido a su alto valor nutricional (50% proteína y 30% grasa) y manejo de residuos (Cuadro 5). La crianza de este gusano tiene también un bajo impacto ambiental [23].

Cuadro 5. Estudios reportados del uso de frass de tenebrio como fertilizante.

Sustrato de crianza	Organismos experimentales	Resultados y observaciones
No se menciona	Calabacín	El frass benefició hasta en un 62%, comparado con el control, el crecimiento de las plantas así como el tamaño del fruto y rendimiento.
No se menciona	Acelga y frijol	El frass obtenido promovió el crecimiento de las plantas así como la tolerancia al estrés. Se sugieren más investigaciones respecto a la cantidad de frass utilizado y tiempo de aplicación para evaluar el efecto.
Salvado de trigo	Cebada	La aplicación del frass mejoró la cantidad de biomasa y la absorción de nutrientes, y aumentó la actividad metabólica y diversidad microbiana.

Fuente: [24] [25] [26].

Frass de grillo (*Acheta domesticus*)

Los grillos se encuentran entre los insectos más consumidos a nivel mundial. Estos insectos se crían con fines comerciales, y se consumen principalmente en países como México, Tailandia y Camboya [27]. Además, el grillo ha cobrado relevancia debido a la tendencia de



elaborar productos alimenticios con la harina obtenida al ser molidos (barras de proteína, bases para postres, entre otros) [28]. En el Cuadro 6 se presentan algunos resultados de experimentos donde se probó el frass de grillo en algunas plantas.

Cuadro 6. Estudios reportados del uso de frass de grillo como fertilizante.

Sustrato de crianza	Organismos experimentales	Resultados y observaciones
No se menciona	Maíz dulce	El control sin frass tuvo un rendimiento significativamente menor que los tratamientos con frass de grillo.
No se menciona	Amaranto	Los cationes del frass podrían estimular la biosíntesis y acumulación de ácido oxálico en la planta. Se requiere usarlo junto a la semilla de neem para evitar esta acumulación de antinutrientes.

Fuente: [28] [29].

Frass de larvas de mosca soldado (*Hermetia illucens*)

Las larvas de la mosca soldado negra son consideradas como una alternativa para la bioconversión de residuos, debido a que pueden desarrollarse en diversos tipos de residuos (Cuadro 7) [13] y tienen eficiencias de conversión desde el 55 al 80% [30].

Cuadro 7. Estudios reportados del uso de frass de larva de mosca soldado como fertilizante.

Sustrato de crianza	Organismos experimentales	Resultados y observaciones
Residuos de cebolla y papa	Ryegrass (tipo de pasto)	Se observó un efecto significativo en la producción. Se sugiere evaluar frass de

		diferentes orígenes y composición con diferentes cultivos.
Residuos de granos industria cervecera	Maíz	El frass se comportó mejor que los fertilizantes probados respecto a rendimiento y eficiencia en uso de nitrógeno.
Residuos de café, masa, pescado, frutas y vegetales	Camote y pimientos en acuaponía	La adición de frass aumentó el contenido de azúcar en pimientos y algunos elementos en el camote.
Residuos de granos industria cervecera	Albahaca, borraja, alforfón, col, apio, achicoria, hisopo, lechuga, perejil, fusa, facelia y salvia	El frass aplicado por encima del sustrato de las plantas mejora el crecimiento de brotes y raíces. Se sugiere aplicar a otro tipo de plantas
Residuos de poda (pasto), mezcla de verduras y frutas y alimento para pollos	Ryegrass (tipo de pasto)	No hubo diferencias entre tratamientos. Puede servir como fuente de nutrientes para las plantas y suelo. Se sugiere mayor investigación a largo plazo.
Mezcla de okara (pulpa de soya) y salvado de trigo	Pak choi (col)	El frass mezclado con biocarbón puede ser utilizado como medio de crecimiento para pak choi.
No se menciona	Pak choi (col)	El frass puede ser utilizado como fertilizante ya que el crecimiento de las plantas fue comparable a las cultivadas con composta.



No se menciona	Calabacín	El frass tuvo una composición salina, lo que afectó negativamente el desarrollo de las plantas.
-----------------------	-----------	---

Fuentes: [13] [31] [32] [14] [15] [33] [34] [24].

IV. Perspectivas

La cría de insectos en residuos promete ser una alternativa para degradar residuos orgánicos al mismo tiempo de generar biomasa de insectos (como proteína) y frass (como fertilizante). En particular, la aplicación del frass puede contribuir a una agricultura sostenible y circular, ya que mejora la productividad de los cultivos y estimula grupos funcionales como las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Las rizobacterias pueden mejorar la resistencia a las plagas y enfermedades [35].

Existen estudios donde se reporta que el frass obtenido de larvas, criadas en residuos de restaurantes y mercados, presenta una calidad considerada como estándar en la agricultura como fertilizante [30]. En pruebas con plantas se ha probado, incluso, su uso potencial como fertilizante orgánico para hortalizas y hierbas [14][36]. Aunque también se ha reportado un efecto negativo en el crecimiento de las plantas como el calabacín, esto se le atribuye a la composición salina [24]. Se sugiere, sin embargo, que se evalúen frass provenientes de diversos residuos y con diferentes cultivos [13], ya que el sustrato utilizado para la crianza de las larvas afecta las propiedades del frass [15].

Desde un punto de vista ambiental, el aprovechamiento de residuos mediante este tratamiento promete disminuir las emisiones que se generan si sólo se vierten en los rellenos sanitarios. Desde un punto de vista económico, la cría de insectos permite obtener productos como biomasa y frass, los cuales están compuestos por grasa, proteína y nutrientes. Esta composición hace que sea más rentable que la producción de biocombustibles u otros productos de valor agregado que pueden venderse a precios más altos que los productos de otros tipos de procesos [37]. Además, su uso puede contribuir a

reducir el uso de fertilizantes orgánicos, mejorar la fertilidad del suelo y productividad de cultivos, además de crear nuevas fuentes de ingresos [38].

Conclusiones

En este trabajo se revisaron los diferentes procesos utilizados para el tratamiento de residuos orgánicos, de los cuales se resalta el tratamiento con insectos debido a su eficiencia y cantidad de productos obtenidos. Entre los productos obtenidos se encuentra el frass de insectos, el cual, se ha reportado, tiene características que lo perfilan como una alternativa a los fertilizantes orgánicos. Se requieren nuevos y diversos fertilizantes para soportar el crecimiento de la agricultura global. En los trabajos revisados en el presente trabajo, se muestra la factibilidad de usar este frass como mejorador de suelo o nutriente para las plantas lo cual, a largo plazo, puede aumentar la sostenibilidad de la agricultura. Es importante resaltar que, en las conclusiones de los trabajos presentados, se sugiere continuar con estudios para determinar el efecto de frass con diferente composición en diversos tipos de cultivo. Finalmente, su uso parece prometedor como una alternativa para incorporar los residuos orgánicos nuevamente en la cadena de producción, y con ello contribuir a al reciclaje sostenible de residuos y a la economía circular.

Referencias

- [1] S. Zhan *et al.*, “Genomic landscape and genetic manipulation of the black soldier fly *Hermetia illucens*, a natural waste recycler,” *Cell Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 50–60, 2020, doi: 10.1038/s41422-019-0252-6.
- [2] T. M. W. Mak, X. Xiong, D. C. W. Tsang, I. K. M. Yu, and C. S. Poon, “Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: Policy review, limitations and opportunities,” *Bioresour. Technol.*, vol. 297, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122497.
- [3] A. Isibika, B. Vinnerås, O. Kibazohi, C. Zurbrügg, and C. Lalander, “Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae,” *Waste Manag.*, vol. 100, pp. 151–160, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.09.017.
- [4] K. C. Surendra, J. K. Tomberlin, A. van Huis, J. A. Cammack, L. H. L. Heckmann, and S. K. Khanal, “Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF),” *Waste*



- Manag.*, vol. 117, pp. 58–80, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.07.050.
- [5] D. Tonini *et al.*, “Quantitative sustainability assessment of household food waste management in the Amsterdam Metropolitan Area,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 160, no. December 2019, p. 104854, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104854.
- [6] J. Kaur, G. Rani, and K. N. Yagalakshmi, *Problems and issues of food waste-based biorefineries*. INC, 2020.
- [7] D. K. S. Ng, K. S. Ng, and R. T. L. Ng, *Integrated Biorefineries*, vol. 4. Elsevier, 2017.
- [8] S. Mishra, M. Roy, and K. Mohanty, “Microalgal bioenergy production under zero-waste biorefinery approach: Recent advances and future perspectives,” *Bioresour. Technol.*, vol. 292, no. June, p. 122008, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122008.
- [9] F. L. Braghiroli and L. Passarini, “Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities,” *Curr. For. Reports*, vol. 6, no. 2, pp. 172–183, 2020, doi: 10.1007/s40725-020-00112-9.
- [10] C. S. Liew *et al.*, “A review on recent disposal of hazardous sewage sludge via anaerobic digestion and novel composting,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 423, no. PA, p. 126995, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126995.
- [11] X. Yang, H. S. Choi, C. Park, and S. W. Kim, “Current states and prospects of organic waste utilization for biorefineries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 335–349, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.114.
- [12] D. Pleissner and B. A. Rumpold, “Utilization of organic residues using heterotrophic microalgae and insects,” *Waste Manag.*, vol. 72, pp. 227–239, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.11.020.
- [13] R. Menino *et al.*, “Agricultural value of Black Soldier Fly larvae frass as organic fertilizer on ryegrass,” *Heliyon*, vol. 7, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05855.
- [14] S. Borkent and S. Hodge, “Glasshouse evaluation of the black soldier fly waste product hexafrass™ as an organic fertilizer,” *Insects*, vol. 12, no. 11, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/insects12110977.
- [15] T. Klammsteiner, V. Turan, M. F. D. Juárez, S. Oberegger, and H. Insam, “Suitability of black soldier fly frass as soil amendment and implication for organic waste hygienization,” *Agronomy*, vol. 10, no. 10 October, 2020, doi: 10.3390/agronomy10101578.
- [16] A. L. Srivastav, *Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination*. LTD, 2020.
- [17] A. S. Baldivia and G. R. Ibarra, “La disponibilidad de alimentos en México: Un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050,” *Papeles Poblac.*, vol. 23, no. 93, pp. 207–230, 2017, doi: 10.22185/24487147.2017.93.027.
- [18] C. O. Dimkpa, J. Fugice, U. Singh, and T. D. Lewis, “Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency – Trends and perspectives,” *Sci. Total Environ.*, vol. 731, p. 139113, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139113.
- [19] F. E. Jaime Calderón, J. W. Castro Guerra, and D. A. Orlando Lucio, “Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en el cultivo de maíz,” *UNESUM-Ciencias Rev. Científica Multidiscip.*, pp. 61–72, 2020.

-
- [20] R. E. Arizaga Gamboa and J. C. Balladares Montero, “Elaboración de abonos orgánicos mediante dos técnicas de compostaje en mercados del cantón La Troncal,” *Sathiri*, vol. 16, no. 1, pp. 144–154, 2021, doi: 10.32645/13906925.1046.
- [21] J. Poveda, “Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review,” *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 41, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s13593-020-00656-x.
- [22] D. Beesigamukama, S. Subramanian, and C. M. Tanga, “Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11336-z.
- [23] R. Moruzzo, F. Riccioli, S. Espinosa Dias, C. Secci, G. Poli, and S. Mancini, “Mealworm (*Tenebrio molitor*): Potential and Challenges to Promote Circular Economy,” *Animals*, vol. 11, no. 2568, pp. 1–16, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ani11092568>.
- [24] J. Zim *et al.*, “A New Organic Amendment Based on Insect Frass for Zucchini (*Cucurbita pepo* L.) Cultivation,” *Environ. Sci. Proc.*, vol. 16, no. 28, 2022, doi: 10.3390/environsciproc2022016028.
- [25] J. Poveda, A. Jiménez-Gómez, Z. Saati-Santamaría, R. Usategui-Martín, R. Rivas, and P. García-Fraile, “Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants,” *Appl. Soil Ecol.*, vol. 142, no. May, pp. 110–122, 2019, doi: 10.1016/j.apsoil.2019.04.016.
- [26] D. Houben, G. Daoulas, M. P. Faucon, and A. M. Dulaurent, “Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-61765-x.
- [27] G. Ssepuyaya *et al.*, “Effect of alternative rearing substrates and temperature on growth and development of the cricket *Modicogryllus conspersus* (Schaum),” *J. Insects as Food Feed*, vol. 7, no. 2, pp. 163–172, 2021, doi: 10.3920/JIFF2020.0014.
- [28] H. Darby, A. Gupta, E. Cummings, L. Ruhl, and S. Ziegler, “Cricket Frass as a Potential Nitrogen Fertility Source,” 2017.
- [29] P. Sriraj, B. Toomsan, and S. Butnan, “Effects of Neem Seed Extract on Nitrate and Oxalate Contents in Amaranth Fertilized with Mineral Fertilizer and Cricket Frass,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 10, p. 898, 2022, doi: 10.3390/horticulturae8100898.
- [30] D. Beesigamukama *et al.*, “Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly,” *Waste Manag.*, vol. 119, pp. 183–194, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.09.043.
- [31] D. Beesigamukama *et al.*, “Exploring Black Soldier Fly Frass as Novel Fertilizer for Improved Growth, Yield, and Nitrogen Use Efficiency of Maize Under Field Conditions,” *Front. Plant Sci.*, vol. 11, no. September, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.574592.
- [32] N. Romano *et al.*, “Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea : Effects on the production and composition of sweetpotato slips and sweet banana peppers,” *Aquaculture*, vol. 555, no. March, p. 738160, 2022, doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738160.
- [33] S. Song *et al.*, “Upycling food waste using black soldier fly larvae: Effects of further
-



- composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential,” *J. Clean. Prod.*, vol. 288, p. 125664, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125664.
- [34] D. Agustiyani, R. Agandi, Arinafril, A. A. Nugroho, and S. Antonius, “The effect of application of compost and frass from Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) on growth of Pakchoi (*Brassica rapa* L.),” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 762, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/762/1/012036.
- [35] K. Y. Barragán-Fonseca *et al.*, “Insect frass and exuviae to promote plant growth and health,” *Trends Plant Sci.*, vol. 27, no. 7, pp. 646–654, 2022, doi: 10.1016/j.tplants.2022.01.007.
- [36] M. Chavez and M. Uchanski, “Insect left-over substrate as plant fertiliser,” *J. Insects as Food Feed*, vol. 7, no. 5, pp. 683–694, 2021, doi: 10.3920/JIFF2020.0063.
- [37] E. Schmitt and W. de Vries, “Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction,” *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 25. Elsevier B.V., p. 100335, 2020, doi: 10.1016/j.cogsc.2020.03.005.
- [38] D. S. S. Oduro, K. S. F. Gyasi, R. B. E. Donkor, and E. A. M. K. Baah, “Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera : Stratiomyidae) larvae,” *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, vol. 8, no. s1, pp. 45–54, 2019, doi: 10.1007/s40093-019-0268-4.

Desarrollo de una estufa a pellet con alimentación mecánica y controlador adaptativo de la combustión para biomasas no convencionales de Argentina

*Development of a pellet stove with
mechanical feeding and adaptative
combustion controller for
nonconventional Argentinian biomass*

Martín Eduardo Rearte, Ing. Dr.

Departamento de Energías Renovables NOA, Dirección Técnica de Industrias Emergentes
NOA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Argentina.

mrearte@inti.gob.ar

[0000-0002-6876-0116](tel:0000-0002-6876-0116)

Marcos Risso, Tec.

Departamento de Energías Renovables NOA, Dirección Técnica de Industrias Emergentes
NOA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Argentina

mrisso@inti.gob.ar

[0000-0002-4582-7453](tel:0000-0002-4582-7453)

Lucas Matías Ayguavella, Ing.



VERAYRE SA. Argentina

layguavella@productosverayre.com.ar

[0000-0002-6082-1447](https://doi.org/10.1000-0002-6082-1447)

Resumen

En Argentina la bioenergía aún es un sector industrial emergente, en el cual, a pesar de haber crecido consistentemente en los últimos 10 años, aún requiere consolidar en materia de visibilidad, normalización y mayor número de actores. Este trabajo toma como partida el marco normativo promovido por INTI en colaboración de IRAM para homologar y adaptar las normas más aceptadas a nivel mundial para su aplicación en nuestro país. Estos estándares, ISO 17225 para biocombustibles y UNE-EN 14785 para los equipos que utilizan este biocombustible, son las herramientas utilizadas por el equipo INTI, para el desarrollo de metodologías para fomentar la incorporación de estándares en la fabricación tanto del BCS como en los equipos de combustión, particularmente para el uso a escala domiciliaria. Este trabajo se centra en las actividades realizadas en el marco de la pandemia, llevadas a cabo con la empresa “Productos Verayre” para promover el desarrollo de estufas a pellet nacionales, quienes pese a las restricciones COVID-19, lograron integrarse al equipo de especialistas del Departamento de Energías Renovables NOA del INTI mediante una metodología de asistencia técnica virtual o “HUB” tecnología a distancia, para dinamizar el desarrollo de su modelo CAD/CAE-3D preconcebido y presentado al INTI como requerimiento inicial para lograr un prototipo fabricable localmente, certificable y cuyo nicho comercial no solo esté basado en el uso de pellet de origen leñoso según ISO 17225-2 y sino que incluya y se adapte a biomásas industrializadas en Argentina de origen no leñoso según ISO 17225-5.

Palabras clave

Recursos energéticos renovables; Biomasa; Combustión; Estufas de pellet; pellet de madera; diseño electromecánico; Estándares de calidad.

Abstract

In Argentina, bioenergy is still an emerging industrial sector, in which, despite having grown consistently in the last 10 years, still requires consolidation in terms of visibility, standardization and a greater number of actors. This work takes as a starting point the regulatory framework promoted by INTI in collaboration with IRAM to standardize and adapt the most accepted standards worldwide for their application in our country. These standards, ISO 17225 for biofuels and UNE-EN 14785 for equipment that use this biofuel, are the tools used by INTI to develop methodologies to promote the addition of standards in the manufacture processes for both BCS and the combustion equipment, particularly for use on a household scale. This work focuses on the activities carried out with the company "Productos Verayre" in times of pandemic to promote the development of national pellet stove, who, despite the COVID-19 restrictions, managed to join the team of specialists of the Department of Renewable Energies of INTI through a virtual technical assistance methodology or "HUB" of remote technology assistance, to dynamize the development of its preconceived CAD/CAE-3D model presented to INTI as an initial requirement to achieve a locally manufacturable prototype, certifiable and whose commercial target is not only based on the use of pellets of woody materials according to ISO 17225-2 but also includes and adapts to industrialized biomass in Argentina of non-woody materials according to ISO 17225-5.

Keywords

Renewable energy sources; Biomass; Combustion; Pellet stoves; Wood pellet, Electromechanics design, Quality standards.

Introducción

En Argentina y el mundo, la bioenergía es la base aún de sector industrial emergente, el cual en los últimos 10 años ha crecido consistentemente mostrando algunos avances en materia de visibilidad, normalización y actores. Este sector se basa en el gran potencial de



generación de biomasa que podría utilizarse con fines energéticos, biomasa no aprovechada que también se asocia a diversas problemáticas ambientales por su falta de gestión e inversiones necesarias. Dado el perfil agroexportador de la mayoría de los países de Latinoamérica, el aumento la demanda energética mundial impulsó la tendencia a identificar y valorizar los recursos biomásicos derivados de la actividad agro forestal e industrial apta o disponible para procesos térmicos e incluso para la generación de energía eléctrica (Ley 27.191, Argentina). Esto también se refleja en la participación de Sudamérica en el mercado internacional de los BCS que, como se puede ver en la Figura 1, para el año 2019 la participación fue de aproximadamente el 1% representando 457.412 toneladas producidas.

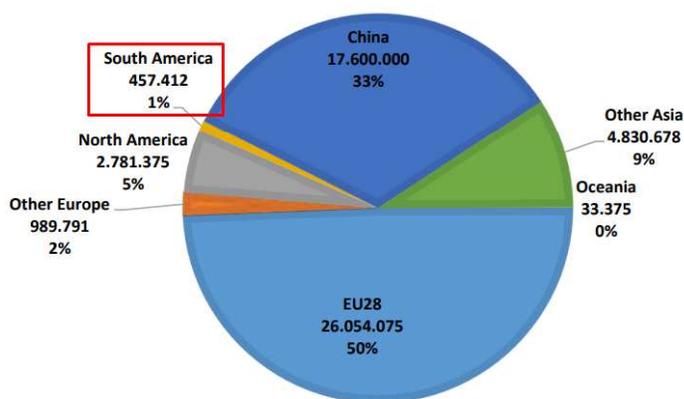


Figura 1 - Distribución del consumo de BCS a nivel mundial. Fuente: Bioenergy Europe: Statistical Report, 2019 [1]

En materia de cuantificación, en Argentina se han realizado diversos estudios, pero uno que es particularmente destacable por su amplitud es el estudio WISDOM de “Mapeo de la oferta y demanda integrada de dendrocombustibles” [2] que estudia con diversas técnicas y criterios la disponibilidad teórica de una matriz muy diversa de biomásas que no son las convencionales desarrolladas o industrializadas en mercados más maduros como el europeo. Este estudio en sus etapas iniciales publicadas en el año 2009 se enfocó en las biomásas residuales disponibles para energía, como se puede ver en la figura 2.

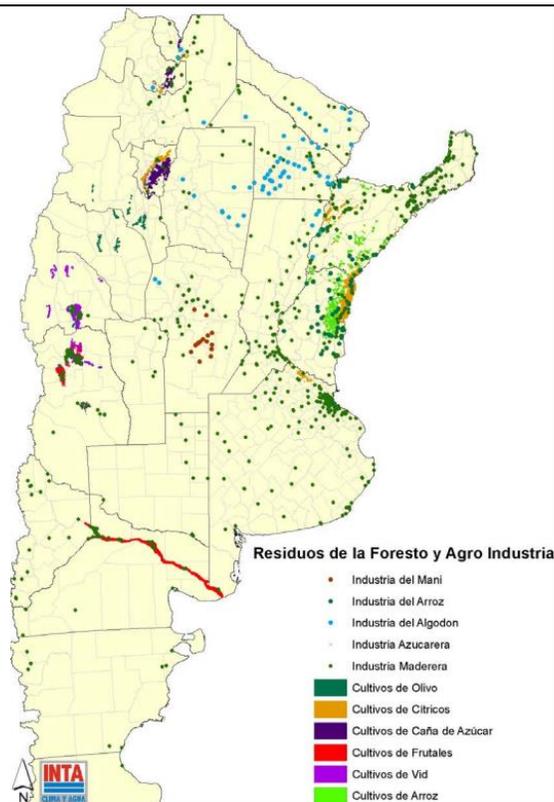


Figura 2. Residuos del agro y foresto industria, Informe WISDOM [2]

Esta disponibilidad de biomásas y las iniciativas de valorización para industrializarla como biocombustible sólido (BCS) que se dieron en Argentina en los últimos 10 años marcaron una barrera técnica debida a las exigencias que imponen los equipos que utilizan biomasa para fines térmicos en mercados desarrollados donde las materias primas derivan de plantaciones energéticas certificadas, que al ingresar al mercado latinoamericano se encuentran con una disponibilidad limitada al biocombustibles de alta calidad [3].

Desde el punto de vista normativo, existen sectores industriales que trabajan bajo estándares reconocidos mundialmente y otros que lo hacen en marcos no regulados evidenciando grandes asimetrías y problemas inserción debido al desconocimiento de las metodologías y tecnologías factibles de adoptar. Este es el caso de Argentina, en donde, durante los últimos años con el impulso del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)



con colaboración de IRAM (organismo de normalización de materiales) se logró homologar y adaptar las normas más aceptadas a nivel mundial para su aplicación, estos son los estándares ISO 17225 para biomasa y BCS y el estándar UNE EN 14785 para los equipos que utilizan este tipo de biocombustible renovables derivado de una gran diversidad de materias primas disponibles.

Con estas herramientas como guía el INTI, en conjunto con pymes nacionales, desarrolló metodologías para fomentar la incorporación de estándares en la fabricación tanto de los biocombustibles sólidos como en los equipos de combustión, particularmente para el uso a escala domiciliaria, es decir para calefacción doméstica. Este trabajo se centra en las actividades realizadas para promover el desarrollo de un proveedor nacional de estufas a pellet, la empresa “Productos Verayre”. Esta estufa de pellet actualmente en carácter de “prototipo” tiene como propósito ampliar el espectro de biomásas de diseño para calefacción incorporando biomásas autóctonas de Argentina, dejando un precedente de adaptación y sumando al mercado un equipo versátil que acorte la barrera de requerimientos de calidad hasta que el mercado se desarrolle y madure desde el punto de vista normativo incorporando otras herramientas como los sellos de calidad propios. Así mismo, las actividades realizadas para lograr el objetivo de transferencia incluyeron la creación de un espacio de intercambio en la plataforma de tecnologías a distancia del INTI e intercambios basados en los avances normativos. Adicionalmente, se muestran los resultados de los ensayos preliminares realizados sobre el primer prototipo de una estufa con control adaptativo a diferentes biomásas derivadas del agro y la foresto industria en Argentina.

Materiales y métodos

La metodología propuesta para impulsar el desarrollo del prototipo y asegurar la transferencia de conocimiento desde el equipo de investigadores INTI al equipo técnico conformado por la empresa VERAYRE, se basó en tres etapas, la primera de desarrollo

trabajando sobre el prototipo, la segunda de ensayos y una tercera de certificación, siendo las dos últimas, trabajos a futuro. Los pasos realizados sobre la etapa I fueron:

- Diagnóstico de diseño CAD/CAE y de fabricación (INTI/VERAYRE)
- Conformado de una “plataforma virtual” de entrenamiento, capacitación y asesoramiento técnico basada en lineamientos de la norma UNE EN 14785 (INTI)
 - a. Evaluación de partes y componentes. (INTI/VERAYRE)
 - b. Asesoramiento en la fabricación y búsqueda de información crítica para el diseño del sistema de control. (INTI)
 - c. Identificación de posibles BCS aptos para el espectro de uso (INTI/VERAYRE)
- Fabricación del prototipo e iteraciones de producción (VERAYRE)
- Pruebas de evaluación (VERAYRE)
 - a. Diseño de los ensayos para evaluar la performance del equipo y la dosificación del pellet. (s/UNE EN 14785) (INTI/VERAYRE)
- Análisis de datos y propuesta de mejora con BCS alternativos (INTI/VERAYRE)

De esta primera experiencia técnica se propuso trabajar en el prototipo específicamente de estufas diseñadas para un nicho comercial donde el biocombustible puede ser de origen no leñoso [4]. Una de las primeras empresas en encomendarse a la tarea de diseño de un equipo de alimentación mecánica que pueda adaptarse a pellets tanto leñosos como no leñosos fue la empresa VERAYRE con el objetivo de lograr contar con un prototipo que pueda evaluarse en el Laboratorio de Biocombustibles INTI el Laboratorio de diseño de equipos para el sector de las EERR de INTI (FabLAB-EERR) donde se realiza la verificación técnica de equipos de combustión llevadas a cabo bajo los lineamientos de la Norma UNE EN 14785, con el objetivo de lograr un producto certificable (Asociación Española de Normalización, UNE, 2007). Cabe destacarse que la empresa ya contaba con un diseño preliminar en el año 2020 que fue evolucionando en retroalimentación del proceso de fabricación e integrando conceptos transferidos y madurados en conjunto con el equipo del FabLAB de INTI.



Resultados

La primera etapa del proyecto se focalizó en la validación del prototipo mediante un proceso iterativo de diseño, comenzando por un diagnóstico integral del diseño CAD/CAE desarrollado a la fecha, siguiendo con la creación del espacio de intercambio e innovación para avanzar con la fabricación del prototipo para al que se sometería a las pruebas con biocombustibles estandarizados según la norma ISO 17225-2. A continuación, se describen los resultados de cada etapa planteadas en la Figura 3 la cual ejemplifica el trabajo iterativo planteado en base a los resultados obtenidos en el prototipo inicial.

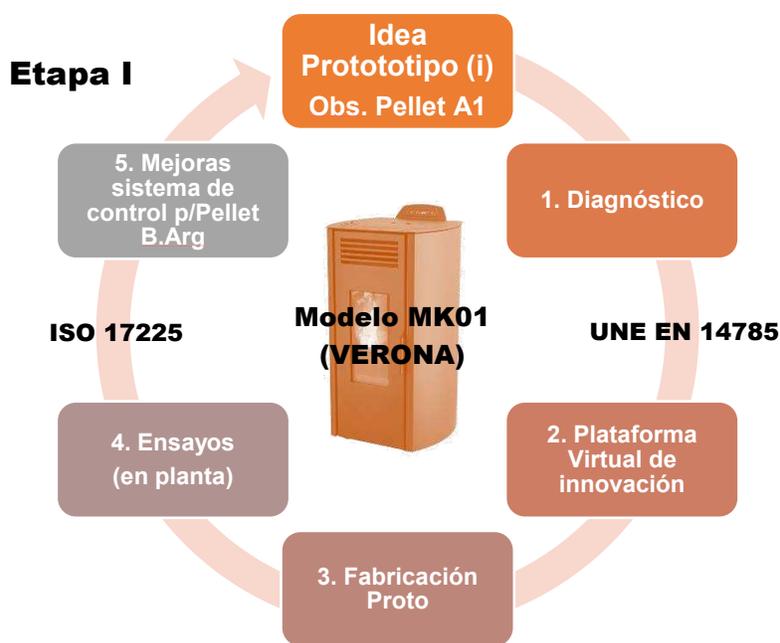


Figura 3. Proceso iterativo de diseño. Fuente [INTI]

a) Diagnóstico del equipo inicial

Como primera instancia de validación de capacidades de la empresa, se realizó un diagnóstico del equipo desarrollado por la empresa en un alto grado de avance. El prototipo estaba digitalizado y parametrizado en un software CAD/CAE para comenzar la fabricación de las partes externas, quedando pendientes los componentes críticos que comandan la combustión.



Figura 4. Diseño 3D 1) Entrada de aire, 2) Sal. de humos, 3) Tolva de carga de combustible, 4) Cámara de combustión. Fuente: [Productos Verayre]

El equipo INTI evaluó el avance en base a los planos y diseños presentados inicialmente y propuso a la empresa conformar un espacio de entrenamiento en la plataforma de capacitación a distancia TAD [6] con la que habitualmente se realizan capacitaciones propias de la oferta tecnológica de INTI.

b) Creación de la “Plataforma virtual” de capacitación e innovación (HUB)

Con el soporte del área de tecnología a distancia (TAD) de INTI y el FabLAB (Laboratorio de Fabricación Industrial dedicado a las energías renovables de INTI), se adaptó la herramienta virtual para trabajar con la empresa debido a las limitaciones ocasionadas por la pandemia COVID-19 resguardando la información sensible o susceptible a propiedad industrial en cuando al diseño y el funcionamiento del equipo. En paralelo, durante este proceso de adaptación y capacitación a la empresa, el equipo INTI interactuó con generadores de biomasa no convencionales (poda de olivares de la Rioja, herbáceas del norte de Rosario, etc.) con el objetivo de identificar variables de ajuste para estos tipos de pellet a futuro (poder calorífico, % de cenizas, humedad, etc.).



Se seleccionaron dos tipos de biomásas para evaluar y tomar de base para el ajuste del sistema adaptativo una vez que se validara su funcionamiento con una biomasa patrón o BCS clasificado según la norma ISO 17225-2 "ISO 17225-2 Solid biofuels - Fuel specifications and classes 2 Part 2: Graded wood pellets". Las biomásas seleccionadas en base a la factibilidad de abastecimiento a futuro para zonas fuera del radio de comercialización del pellet de pino fueron el Caldén y el Olivo.

Parte del trabajo realizado en la plataforma fue la evaluación de "partes y componentes" críticos para el prototipo, desde los ventiladores (forzador e inducido) hasta el encendedor de la carga inicial. La experiencia de base del equipo de Verayre fue crucial para el desarrollo ya que no solo tenían conocimiento sobre los equipos de combustión sino también sobre procesos de fabricación de componentes metálicos.

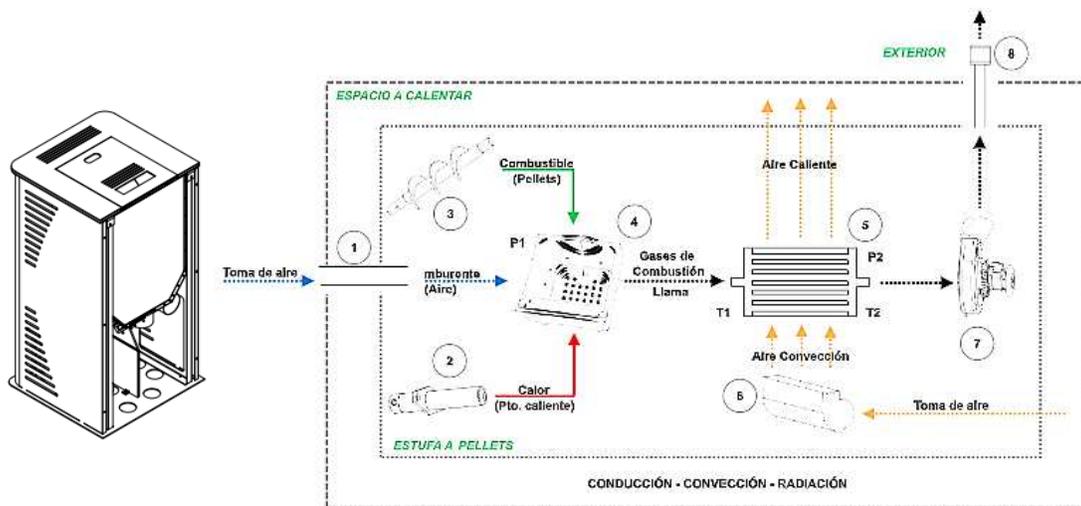


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una estufa de pellet. Fuente: [INTI]

En el análisis integral se analizaron cada uno de los puntos descritos en el diagrama de la Figura 5, 1) la admisión de aire, 2) el encendido electrónico, 3) la alimentación por tornillo al crisol, 4) la combustión en crisol o la parrilla, 5) el aire ambiente calefaccionado en el intercambiador de calor, 6) el intercambiador de calor, 7) el ventilador de tiro inducido y finalmente 8) la salida de gases.

c) Fabricación del prototipo

Basado en los avances del trabajo en equipo y el análisis de la información específica de cada componente, la empresa pudo avanzar con la fabricación del prototipo. Luego de trabajar en la definición de los aspectos técnicos y de seguridad, se comenzó a desarrollar el “software adaptativo” a los diferentes BCS objetivo.



Figura 6. Proceso de fabricación del prototipo. Fuente: [Productos Verayre]



Figura 7. Montaje de controlador electrónico de combustión. Fuente: [Productos Verayre]

En esta estufa se desarrolló un sistema de control de combustión con varias innovaciones, incorporando un lazo de control de temperatura a diferencia del control por tiempos (ON/OFF), que permite, trabajar de manera continua a diferencia de otros modelos comerciales. Esto, en conjunto con la electrónica de corriente continua da como resultado



la eliminación de los picos de consumo (parada y arranque) mejorando la eficiencia y reduciendo el consumo eléctrico, para que en un futuro se pueda adaptar una batería con un panel fotovoltaico de dimensiones y costos aceptables para que el equipo pueda utilizarse en zonas sin suministro eléctrico.

d) Ensayos preliminares

La empresa durante el año 2021 finalizó el desarrollo con el controlador adaptativo de la combustión para poder ampliar el espectro de calidades del BCS en base a la información provista por el Laboratorio de Biocombustibles de INTI. Durante el año 2022 se terminó la instalación o adaptación de los componentes críticos y se definieron diferentes parámetros para realizar ensayos preliminares en planta con un pellet leñoso tipo A1 según ISO 17225-2. El propósito de las pruebas preliminares realizadas en la empresa fue lograr la estabilidad de control y la funcionalidad de los diferentes componentes, para establecer las bases operación para los usuarios de manera que el equipo sea apto para los ensayos de verificación y posterior certificación en INTI (etapas 2 y 3 del proyecto).



Figura 8. Prototipo preparado para los ensayos preliminares en la planta de la empresa VERAYRE. Fuente: [VERAYRE]

Para lograr estos objetivos VERAYRE desarrolló una aplicación para adquisición de datos en “Phyton” la cual registra casi en tiempo real la lectura de los diferentes sensores con una

TAD de 0,5 segundos mostrando el comportamiento del sistema a las diferentes velocidades de giro de los motores que controlan la combustión y el intercambio de calor.

Una vez finalizado y preparado el prototipo, el INTI acompañó las pruebas con algunas recomendaciones basadas en el trabajo conjunto y las normas de referencia que se aplican en el “Banco de pruebas de estufas” (BPE) en el Laboratorio de Biocombustibles. Los responsables de la empresa ejecutaron estas pruebas preliminares recopilando datos para posterior análisis de los técnicos de INTI utilizando un pellet A1 de Pino Ellioti. Los resultados de los ensayos se muestran en las figuras 9 y 10.

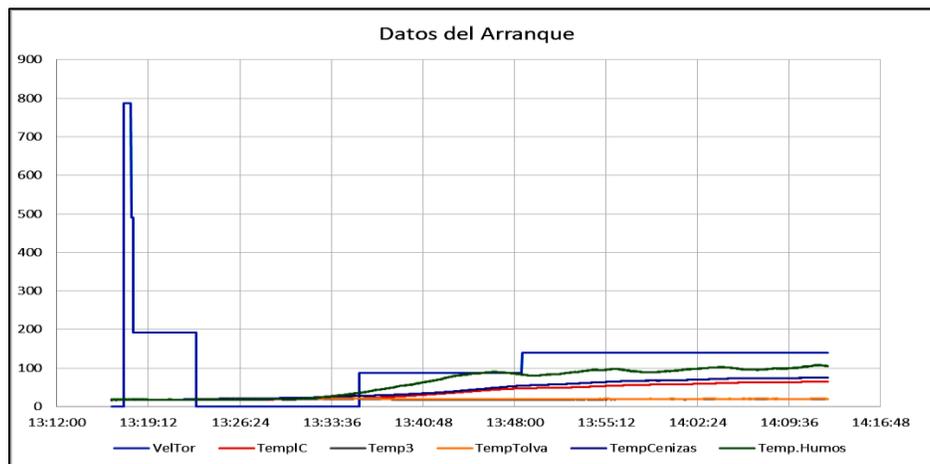


Figura 9. Curvas de control de temperatura en el arranque

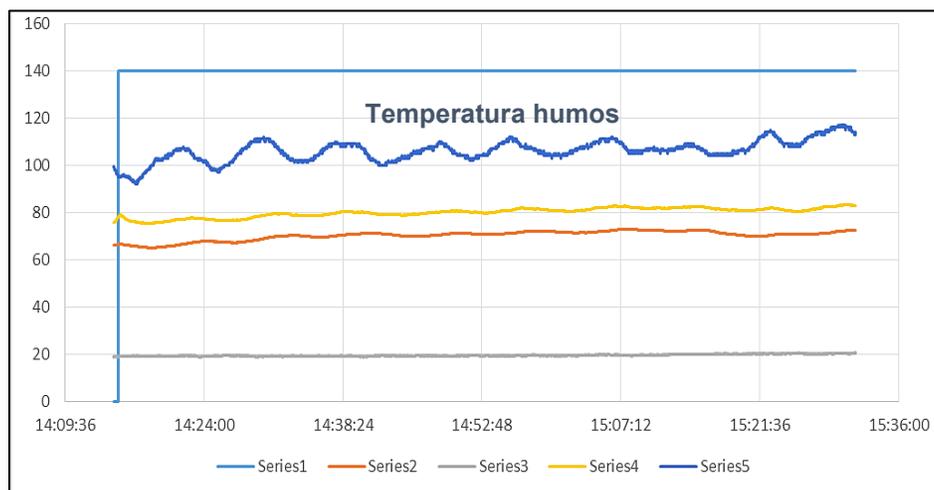


Figura 10. Ensayo de potencia nominal basado en UNE EN 14785.



En la Figura 9, se pueden ver los datos del arranque, la serie “veltor” corresponde al tornillo de carga que al principio se ubicó a máxima velocidad para la carga del crisol. A posterior la velocidad del tornillo se fue ajustando en función de las temperaturas requeridas (temperatura de humos, del cajón de cenizas, de la tolva y las de control). En la Figura 10, se puede ver que la serie 1 corresponde a la velocidad del tornillo en rpm (valor del gráfico sobre 1000), estableciendo una velocidad constante a la potencia 2 del controlador electrónico. También se puede observar la temperatura de humos entre 90 y 120 °C (Serie 5) dentro del rango que indica la norma. La serie 3 corresponde a la temperatura de la tolva de alimentación, la serie 2 y 4 corresponden a las temperaturas de control (debajo del cajón cenicero).



Figura 11. Pruebas de combustión en la estufa con pellet de pino. Fuente [VERAYRE]

Luego de lograr la estabilidad de operación de la estufa con un BCS estandarizado tipo A1 de pino, se procedió a conseguir muestras de pellet “no convencionales” en función a las biomásas objetivos discutidas en los apartados anteriores. El primer BCS analizado en el Laboratorio y puesto a prueba en la estufa fue el pellet de “poda de olivo” también A1 pero para aplicaciones industriales, producido en la región de cuyo (Figura 12).



Figura 12. Muestras de pellet de Poda de Olivos A1 industrial y de Pino Elliotti A1, utilizadas durante los ensayos de control adaptativo. Fuente [INTI/VERAYRE]

Actualmente, se completó el sistema de control adaptativo para poder configurar el funcionamiento de la estufa con diferentes pellets fabricados a partir de biomásas no convencionales en Argentina y se realizaron ensayos de control de temperaturas de seguridad según el requerimiento normativo como se puede observar en la Figura 13. Estos estudios termográficos verificaron que, trabajando con las biomásas objetivo, las temperaturas se encontraban dentro de los rangos de seguridad.



Figura 13. Termografías de control de temperatura de seguridad. Fuente: [VERAYRE]

Conclusiones

El trabajo interdisciplinario para el abordaje de retos de diseño en el campo de la bioenergía es una herramienta estratégica ya que la retroalimentación de las variables de diseño derivadas de las biomásas energéticas no es una información accesible para las nuevas pymes metalúrgicas que buscan posicionarse en este sector industrial. Así mismo, la



apertura al trabajo de desarrollo con una entidad de I+D es una actitud promotora de la industria, en este caso el INTI.

En cuanto a los resultados obtenidos hasta la fecha, los datos muestran una buena respuesta del equipo sin mayores inconvenientes asociados al manejo de pellet “no convencional” logrando períodos de operación razonales antes de requerir una intervención por parte del usuario. El siguiente paso, finalizadas las pruebas y validados los resultados por el equipo, avanzar con el montaje del prototipo en el BPE-FabLAB de INTI para realizar una verificación normativa y una vez que la empresa consiga los medios para escalar y estandarizar la producción, avanzar sobre la última etapa de certificación de producto nacional. El proceso de transferencia no fue unilateral, sino que a medida que la empresa plasmaba el diseño en piezas y componentes, los retos de adaptación a proveedores o materiales más accesibles fue una experiencia enriquecedora para todo el equipo. Así mismo, los intercambios técnicos desde el inicio del contacto INTI-VERAYRE llevaron a la empresa a participar y sumarse al subcomité de BCS en IRAM para aportar sus opiniones técnicas en base a este desarrollo para contar en el futuro, con una norma que se pueda aplicar a este tipo de diseños nacionales. En necesario realizar mayor cantidad de ensayos y ensayos de larga duración para comprobar el efecto a largo plazo del pellet en este prototipo para validar e incluso desarrollar un procedimiento de mantenimiento adaptado a la nueva condición de generación de calor, cenizas y limpieza.

Discusión

Se debe continuar con la validación de biomásas no convencionales aptas para ser utilizadas para la producción de pellet para aplicaciones como esta. Muchas de las biomásas disponibles en los estudios de la FAO y otros similares que se han sucedido en la última década no cuentan aún con un grado de detalle técnico suficiente para poder validar su uso en equipos de combustión, razón por la cual la profundidad en el trabajo de laboratorio es crucial para lograr dar credibilidad y seguridad al sector bioenergético en la escala

residencial. Otro punto de discusión es el desarrollo de equipos de bajo costo, ya que las exigencias normativas propuestas en la Norma UNE EN 14785 llevan a materiales y componentes que encarecen los equipos tendiendo a los modelos europeos, aún no se ha planteado una alternativa para lograr un equipo de prestaciones seguras pero que sea más accesible o equivalentes a los equipos de calefacción con leña. Sí se ha considerado en el desarrollo de este prototipo la posibilidad de independizar de la red el abastecimiento eléctrico integrando un sistema solar fotovoltaico para proveer la energía necesaria para el control de la combustión.

Agradecimientos

A Productos Verayre por la colaboración para la redacción del artículo y por formar parte del equipo de trabajo. Lucas Ayguavella, Maximiliano Verardo, Damian Pirlo, S. Kirikian. Al Laboratorio de Biocombustibles de INTI por proveer datos de las biomásas objetivo para calibración del software de control (Ing. Florencia Peralta, Lic. Florencia Alanis, Karen Danielsen y Lic. Yamile Samaja).

Referencias

- [1] C. Calderón, "Bioenergy Europe: Statistical report 2019", Bioenergy Europe, Brussels, 2019.
- [2] M. Trossero et al, "Análisis del balance de energía derivada de la biomasa en Argentina", Roma: FAO, 2009.
- [3] International Organization for Standardization, "ISO 17225-2 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets", International Organization for Standardization, Vernier, Geneva, 2014.
- [4] International Organization for Standardization, "ISO 17225-6:2021 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets", International Organization for Standardization, Ginrebra, 2021.
- [5] Asociación Española de Normalización, UNE, "UNE-EN 14785:2007 Residential space heating appliances fired by wood pellets - Requirements and test methods", Asociación Española de Normalización, UNE, Madrid, 2007.
- [6] Instituto Nacional de Tecnología Industrial , "TAD - Trabajo y educación a distancia", INTI, 2019. [En línea]. Available: <https://virtualted.inti.gob.ar/>. [Último acceso: 2019].



Análisis Exergético y Económico para el diseño de procesos – Caso de estudio planta de pirólisis de residuos agroindustriales

Exergetical and Economic Analysis for the design of processes - Case study agroindustrial waste pyrolysis plant

Harvey Andres Milquez Sanabria

Universidad de América. Colombia

harvey.milquez@profesores.uamerica.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-4515-7039>

Resumen

Los residuos agroindustriales son una excelente fuente de materias primas y vectores energéticos, sin embargo, su procesamiento puede conllevar a costos y gastos adicionales a los que las industrias tradicionales, bajo un modelo de economía lineal, tienen presupuestados. Los procesos termoquímicos son una alternativa para la obtención de materias primas y vectores energéticos, pero como todo proyecto de inversión debe pasar por una serie de etapas, una de las primeras etapas es el diseño conceptual, el cual puede llevarse a cabo utilizando simuladores de procesos. En este sentido este artículo trae consigo una metodología apalancada en el uso de simuladores, para integrar aspectos

ambientales relacionados con el análisis de la segunda ley de la termodinámica, y económicos para el diseño de procesos y proyectos. Se presentan las principales características que Aspen Plus v.10 requiere para simular el proceso químico, además se relaciona con el cálculo de la eficiencia exergetica de las corrientes de proceso, auxiliares y los equipos; y finalmente se muestra el de costeo específico exergetico (SPECOC), para el costeo exergetico del proyecto. De acuerdo con la literatura consultada y experiencia obtenida en la aplicación de dicha metodología, se puede indicar que tiene excelente potencial para el diseño de procesos en la etapa conceptual, teniendo en cuenta además de los aspectos técnicos, aspectos ambientales y económicos.

Palabras clave

Diseño de proyectos; Economía de la energía; Recursos renovables; Energía de la biomasa; simulador de procesos.

Abstract

Agro-industrial residues are an excellent source of raw materials and energy vectors; however, their processing can lead to additional costs and expenses to those traditional industries in a linear economy model. Thermochemical processes are an alternative for obtaining raw materials and energy carriers, but as any investment project must go through a series of stages, one of the first stages is the conceptual design, which can be carried out using process simulators. In this sense, this article brings with it a methodology leveraged in the use of simulators, to integrate environmental aspects related to the analysis of the second law of thermodynamics, and economic aspects for the design of processes and projects. The main characteristics that Aspen Plus v.10 requires to simulate the chemical process are presented, it is also related to the calculation of the exergetical efficiency of the process, auxiliary and equipment currents; and finally, the specific exergetical costing (SPECOC) is shown, for the exergetical costing of the project. According to the literature consulted and the experience obtained in the application of said methodology, it can be



indicated that it has excellent potential for the design of processes in the conceptual stage, considering, in addition to the technical aspects, environmental and economic aspects.

Keywords

Project design; Energy economics; Renewable resources; Biomass energy; Processes simulator

Introducción

La diversificación de la matriz energética a nivel mundial se ha convertido en un aspecto relevante de investigación en la actualidad. El séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) busca fortalecer el acceso de diversas comunidades a combustibles limpios y seguros. Las energías renovables emergen como una alternativa para ampliar la matriz energética, es por ello por lo que se han realizado investigaciones relacionadas con el desarrollo y aplicación de energía solar [1], energía eólica [2], energía geotérmica [3], energía mareomotriz [4], biocombustibles [5] y biomasa [6], entre otras. La biomasa es un recurso variado debido a la diversidad de orígenes que tiene [7]. Dentro de la biomasa, se encuentra la biomasa residual, que se deriva de transformaciones naturales o antropogénicas. Esta biomasa puede ser utilizada como una fuente energética, a través de cuatro conjuntos de procesos: termoquímicos, mecánicos, químicos y biológicos [8].

Los procesos termoquímicos se pueden dividir en torrefacción, pirólisis, gasificación y combustión en función de la concentración de oxígeno en la reacción [9]. Una etapa temprana de diseño de procesos es el diseño conceptual, en donde se plantean tareas las cuales en conjunto propenden a obtener una solución a un problema planteado, a partir de especificaciones, requisitos y necesidades [10]. Sin embargo, este tipo de enfoques muchas veces deja fuera aspectos relacionados con la eficiencia energética de los procesos, la cual se retoma solo en fases finales del proceso de diseño, estableciendo así una limitante a los resultados encontrados.

La exergía es una propiedad termodinámica, que surge como resultado del análisis de un proceso con base en las dos primeras leyes de la termodinámica. Son múltiples las definiciones establecidas para esta propiedad, pero para los límites de este documento se considera como la energía máxima que se puede transformar en trabajo útil y se puede utilizar como una herramienta para analizar la eficiencia de los procesos industriales [11]. La evaluación económica del proceso tiene limitaciones, entre las cuales se resalta que indicadores son tan eficientes como las variables que fueron involucradas en los cálculos de estos; y dejan de lado elementos propios del sector como los altos niveles de inversión y las dificultades de acceso a las materias prima [12].

El objetivo de esta investigación es brindar al lector las bases conceptuales para el diseño de procesos químicos integrando condiciones exergéticas y económicas como dos aspectos relevantes en la eficiencia energética del proceso y por ende, en el desarrollo sustentable de la ingeniería de procesos.

Materiales y métodos

La presente investigación es de tipo de ingeniería aplicada, desde el punto de vista experimental utilizando simuladores de procesos químicos y bioquímicos; a través de métodos descriptivos y modelos matemáticos para alcanzar los objetivos propuestos. A continuación, se exponen los aspectos más relevantes de la metodología utilizada.

Los residuos agroindustriales tienen un excelente potencial energético [13], pero es necesario definir algunas propiedades para que pueda ser definido en los simuladores de procesos [14]. Para el caso de estudio actual se utilizó el programa Aspen Plus v10, en el cual se debe definir la materia prima a través de su análisis próximo, último y de azufre [15]. En el trabajo realizado por Tangsathitkulchai y col., 2019 se presenta la simulación del proceso de pirólisis usando el programa COCO, para los siguientes residuos



agroindustriales: cuesco de palma, cuesco de coco, torta de palmiste, residuos de pulpa de mandioca y residuos de semillas de longana [16].

La planta de pirólisis se planteó a través de la unión de múltiples operaciones unitarias presentes en el programa Aspen Plus v10. El proceso inicia con el secado de la materia prima, seguido el proceso de descomposición y reacción de pirólisis a las condiciones definidas por el usuario, y las cuales afectan directamente la información que se le debe brindar a cada bloque. Para el caso de pirólisis instantánea, la cinética de la reacción no es necesaria [17], sin embargo si lo que se pretende es simular un proceso de pirólisis lenta, es necesario contar con los datos cinéticos de la reacción [18]. Los productos derivados de la reacción se pueden clasificar en sólidos, líquidos y gases; es por ello que se plantea una serie de operaciones unitarias para la separación de las fracciones: char, bio-oil y gas [19], respectivamente por sus siglas en inglés. Dependiendo de las condiciones del mercado, cada una de las fracciones se pueden valorizar, o es posible de acuerdo con los criterios del equipo diseñador integrar energéticamente el proceso haciendo la combustión de los productos sólidos y gaseosos de la reacción, como se presenta en la figura 1.

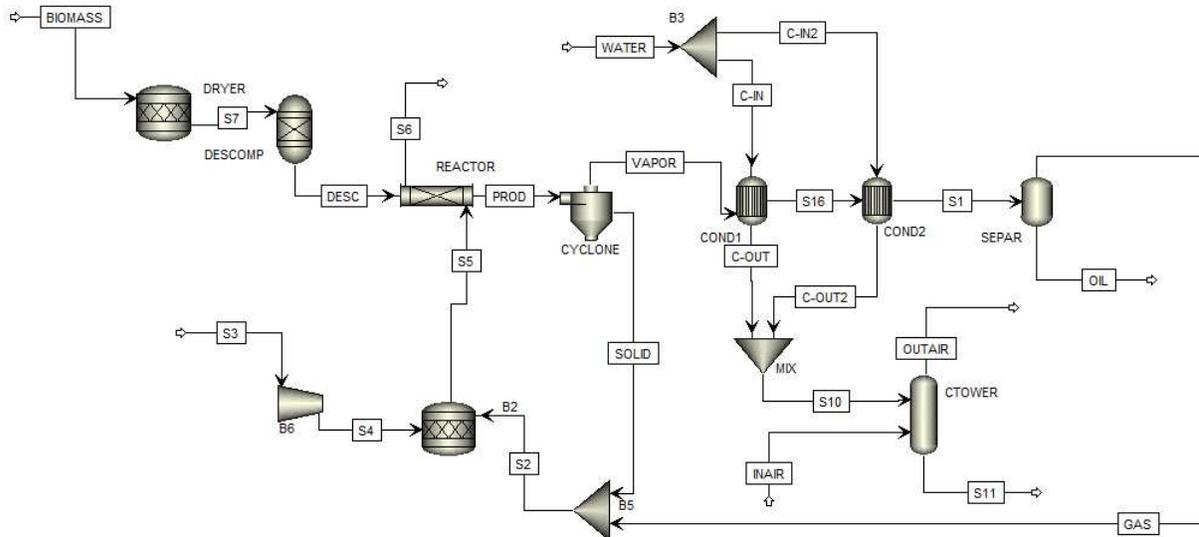


Figura 1. Diseño del sistema de pirólisis de residuos agroindustriales.

La exergía es una propiedad termodinámica que muestra la cantidad de energía en términos de su utilidad en un proceso, cuando llega al equilibrio con el ambiente. La exergía se puede dividir en cinética, potencial, química y física; para fines prácticos se considera despreciables los términos cinéticos y potenciales, puesto que su valor numérico es mucho menor a los términos químicos y físicos [20]. Para los fines prácticos de la propuesta, la exergía, para los componentes que se encuentran en la base de datos de Aspen Plus v10, se calcula a partir de la entalpía y la entropía de cada una de las corrientes involucradas en el proceso [21].

El análisis de costo de inversión del proyecto se realiza utilizando la herramienta que tiene para tal fin el programa Aspen Plus v10.: se dispone de los costos fijos y los costos operativos, para el posterior cálculo del costo total de inversión. Si bien la casa matriz del simulador hace actualizaciones de los costos tanto fijos como variables, estas muchas veces se ven afectadas por la depreciación anual y por el tipo de cambio, por lo que se hace necesario actualizar dichos valores en toda la propuesta.

Finalmente, la integración entre el análisis de costo de inversión y el análisis exergético se hace mediante el método de costeo específico exergético (SPECO, por sus siglas en ingles). En términos generales, el método define y calcula la eficiencia exergética y la exergía relativa a los costos térmicos del sistema propuesto [22]. Es por ello, que este método, es un vínculo directo entre la energía utilizada como combustible en el proceso y los respectivos productos obtenidos; junto con los costos relativos emerge como una herramienta para involucrar la eficiencia energética y el diseño de procesos, con aspectos ambientales y económicos en el diseño de procesos.

Resultados

Caracterización residuos agroindustriales



En el cuadro 1 se pueden observar las principales características de los residuos agroindustriales, enfocados a los requerimientos que tiene el programa Aspen Plus v10, para su definición como componente no convencional. Inicialmente se puede observar una amplia variedad de residuos agroindustriales, que se pueden utilizar como fuente de vectores energéticos [23], o bien, como fuente de diversidad de materia prima en un proceso de economía circular [24].

De la misma manera se puede observar que existe en general una alta posibilidad de aplicar procesos termoquímicos para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, debido a que la concentración de sólidos volátiles es superior al 50% de la fracción seca de los residuos [25], con la excepción de los residuos de raíz de piña y cáscara de coco. Sin embargo, también es necesario diseñar el proceso incluyendo una etapa previa de secado, debido a que en la mayor parte de los casos la humedad es superior al 10% [14], con la excepción de los residuos de estiércol de vaca, pulpa de mango y hojas de *Chromolaena odorata*, que pueden tener otras vías de aprovechamiento biológico [26]. Finalmente es relevante mostrar que, los procesos termoquímicos de residuos agroindustriales pueden generar productos con bajo contenido de azufre, importante principalmente en combustibles [27], debido a que la misma materia prima contiene una baja concentración de este precursor.

Cuadro 1. Análisis próximo y último de diferentes biomásas

Tipo de residuos	Análisis Próximo (% p/p)				Análisis Ultimo (% p/p)					Fuente
	Humedad	Sólidos Volátiles	Cenizas	Carbón Fijo	C	H	N	O	S	
Tallo planta de plátano	15	76,67	6,8	1,53	40,4	6,02	0,11	53,47	0	[4]
Árbol de Donadona	26,99	61,84	1,53	6,97	32,73	4,36	31,57	31,34	0	[23]

Raquis de Mazorca	9,53	81,11	2,43	6,93	41,48	5,5	12,68	40,34	0	
Cáscara de semilla de girasol	9,13	83,69	3,18	4	40,74	5,37	13,35	40,54	0	
Semilla de dátil	6	86	2,51	5,49	42,81	5,66	9,39	42,14	0	
Hoja de piña	6,75	51,74	7,349	34,16	43,43	6,69	1,73	59,25	0,04	[24]
Tallo de piña	9,10	58,25	7,476	25,18	41,09	6,70	1,44	57,27	0,56	
Raíz de piña	4,54	41,56	30,073	28,82	38,70	5,39	1,44	75,42	0,23	
Cáscara de coco	2,47	38,73	40,21	18,59	51,46	2,74	9,79	35,7	0,31	[25]
Cáscara banana de Mbwazirume	10,60	69,988	5,825	13,582	46,94	5,79	0,23	46,74	0,3	[26]
Cáscara banana de Nakyinyika	12,36	69,98	4,773	12,879	46,22	5,6	0,41	47,41	0,36	
Hojas de mango	5,69	63,25	11,63	18,03	43,84	5,45	0,36	50,13	0,22	[27]
Hojas de naranja	4,39	78,8	7,44	9,37	44,01	6,26	0,39	49,06	0,28	
Hojas de dátiles	4,38	80,53	7,12	7,97	47,23	6,56	0,23	45,6	0,38	
Residuos de hortalizas	5,21	68,36	14,35	12,08	39,01	5,8	0,25	54,47	0,47	



Residuos de girasol	5,51	63,25	8,11	23,13	35,83	5,2	0,16	58,55	0,26	
Estiércol de vaca	85,82	60,75	5,6	22,67	43,08	7,87	1,53	47,06	0,46	[28]
Pulpa de mango	85,77	62,78	3,85	22,02	39,98	6,74	1,34	51,82	0,12	
Hojas de <i>Chromolaena odorata</i>	83,11	71,49	5,12	13,5	41,69	9,86	1,51	46,69	0,25	

Análisis exerético

Las principales ecuaciones para el análisis exerético se describen a continuación. Las suposiciones iniciales que se pueden realizar son: estado estacionario, exería cinética y potencial despreciables. El balance exerético para estado estacionario se describe en la ecuación 1, donde Ex_{ent} y Ex_{sal} representan los combustibles y productos, respectivamente; Ex_{des} es la velocidad de destrucción exerética. Por su parte, la eficiencia exerética se describe en la ecuación 2

$$\sum Ex_{ent} - \sum Ex_{sal} = Ex_{des} \quad (1)$$

$$\eta_E = \frac{\sum Ex_{sal}}{\sum Ex_{ent}} \quad (2)$$

La exería física de la biomasa, para el caso de estudio desarrollado, no se tuvo en cuenta debido a que se parte de biomasa a temperatura y presión estándares. La exería química de la biomasa se puede calcular mediante la correlación de Szargut y col., 1988 [28] presentada en la ecuación 3.

$$E^{ch} = (LHV_{sec} + \lambda \cdot x_m) \cdot \beta_{sec} + 9417 \cdot x_{S_{sec}} \quad (3)$$

Donde LHV_{sec} es el poder calorífico inferior dado por las ecuaciones 4 y 5; λ es el calor latente de vaporización del agua a condiciones estándares; x_m es la fracción másica de la humedad y β_{sec} es la relación de la exergía química estándar específica y el poder calorífico inferior en base seca dado por la ecuación 6.

$$LHV_{sec} = HHV_{sec} - 2.442 * (8.936H/100) \quad (4)$$

$$HHV_{sec} = 0.3578 * \%C + 1.1356 * \%H + 0.0594 * \%N - 0.0854 * \%O - 0.974 \quad (5)$$

$$\beta_{sec} = 1.0437 + 0.1882 \cdot (x_H/x_C) + 0.0610 \cdot (x_O/x_C) + 0.0404 \cdot (x_N/x_C) \quad (6)$$

Para los gases generados en el proceso termoquímico, la exergía física se calcula mediante la ecuación 7, donde la entalpía (h) y la entropía (s) se obtuvieron de Aspen Plus v.10; tomando como condiciones de referencia (p_0, T_0) de 25 °C y 101.3 kPa, respectivamente. Para la exergía química se consideraron ideales las corrientes gaseosas, de acuerdo a lo reportado por Atienza-Martínez y col, 2018 [29]; expresada en la ecuación 8.

$$E^{ph} = h(p, T) - h(p_0, T_0) - T_0[s(p, T) - s(p_0, T_0)] \quad (7)$$

$$E^{ch} = \sum_i x_{gas,i} \cdot e_{ch,gas,i} + R \cdot T_0 \cdot \sum_i x_{gas,i} \cdot \ln x_{gas,i} \quad (8)$$

Método de costeo específico exergético (SPECO)

El método de costeo específico exergético (SPECO), fue desarrollado por Lazzaretto y Tsatsaronis en el año 2002. En este modelo se definen y calculan las eficiencias y los costos exergéticos relacionados en sistemas térmicos. En términos generales, el combustible y los productos se definen teniendo en cuenta un registro sistemático de todas las adiciones y remociones de corrientes exergéticas en el sistema, y los costos se calculan aplicando los principios básicos de la administración financiera de negocios [30].

El balance de costos exergéticos se puede describir por medio de la ecuación 9; en ésta se describe la suma de todos los costos de corrientes exergéticas ingresando a la unidad k y los



costos de las operaciones unitarias \dot{Z}_k (inversión de capital, operación y mantenimiento de cada unidad) es igual a la suma de todos los costos de las corrientes saliendo de la unidad k , además de los costos exergéticos asociados a las corrientes de energía (trabajo o calor).

$$\sum_{sal}(c_{sal} \cdot \dot{E}_{sal})_k + c_{w,k}\dot{W}_k = \sum_{ent}(c_{ent} \cdot \dot{E}_{ent})_k + c_{Q,k}\dot{E}_{Q,k} + \dot{Z}_k \quad (9)$$

El balance de costos se define en términos del combustible y de los productos, como se muestra en la ecuación 10. La exergía destruida en cada componente se calcula con la ecuación de costo de combustible presentada en la ecuación 11, donde $\dot{C}_{D,k}$ es el costo de la destrucción exergética del componente k .

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k - \dot{C}_{D,k} \quad (10)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k}\dot{E}_{D,k} \quad (11)$$

El costo de cada componente k se expresa como el costo por unidad de tiempo \dot{Z}_k (\$/h), dados por las ecuaciones 12 y 13, donde CRF es el factor de recuperación de capital, φ es el factor de mantenimiento, N es el número de horas operativas al año, i es la tasa de interés y n es el tiempo de vida útil del proyecto.

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N} \quad (12)$$

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (13)$$

Resultados del análisis exergético en procesos termoquímicos

En el cuadro 2 se presentan los resultados de múltiples investigaciones en donde se ha encontrado la eficiencia exergética de procesos termoquímicos para el aprovechamiento energético y en materias prima de residuos industriales. Se puede observar que la temperatura afecta la eficiencia exergética del proceso. Para el caso de briquetas de madera se puede ver que aumentar 200°C hace que aumente en, aproximadamente, un 17% la eficiencia. Por otro lado, la torrefacción también emerge como un proceso con alta

eficiencia, sin embargo, los productos pueden ser menos comercializables. Finalmente, también es necesario identificar modificaciones en el diseño de procesos termoquímicos, porque de acuerdo con lo que indica Li y col., 2019 modificaciones en el proceso, incluyendo etapas previas de secado de la materia prima, permiten mejorar la eficiencia exergética de los procesos termoquímicos [31].

Cuadro 2. Eficiencias exergéticas en procesos termoquímicos

Biomasa	Proceso	Eficiencia (%)	Referencia
Residuos de banana	Pirólisis	45,61	[14]
Mezquite (<i>Prosopis juliflora</i>)	Pirólisis	45	[32]
Plástico	Pirólisis	64,1	[33]
Paja de trigo	Gasificación	68,6	[31]
Lodos agua residual	Torrefacción	87,8	[29]
	Pirólisis	71,3	
Briquetas de madera	Pirólisis (400 °C)	46,32	[34]
Briquetas de madera	Pirólisis (600 °C)	75,77	
Residuos de microalgas	Gasificación	57	[35]

Conclusiones

La metodología presentada en este artículo cumple con los objetivos del diseño de procesos químicos, enfocados a procesos termoquímicos. Permite al usuario establecer, analizar y optimizar diferentes escenarios, teniendo en cuenta no solo aspectos técnicos propios, sino también aspectos económicos y ambientales. Se presentan resultados de diversos autores, los cuales validan la aplicabilidad de la metodología descrita, tanto a nivel teórico como a nivel experimental. Es relevante indicar que, en proyectos de economía circular, los procesos termoquímicos pueden aportar al aprovechamiento integral de los residuos, que por otras vías pueden ser más costosos o ineficientes.



La metodología permite no solo definir diferentes opciones de proceso, sino que se pueden evaluar y optimizar condiciones de las materias primas, de los procesos e integrar energéticamente el proyecto. Los gases de combustión pueden ser limpiados antes de emitirse a la atmósfera, lo cual reduciría drásticamente los impactos ambientales del proyecto.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad de América por el apoyo financiero para desarrollar la investigación. Y a la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T).

Referencias

- [1] J. Gong, C. Li, and M. R. Wasielewski, "Advances in solar energy conversion," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 48, no. 7, pp. 1862–1864, 2019.
- [2] E. Hart *et al.*, "A review of wind turbine main bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection," *Wind Energy Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 105–124, 2020.
- [3] M. Soltani *et al.*, "Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 140, p. 110750, 2021.
- [4] S. Ghosh, S. Das, and R. Chowdhury, "Effect of pre-pyrolysis biotreatment of banana pseudo-stem (BPS) using synergistic microbial consortium : Role in deoxygenation and enhancement of yield of pyro-oil," *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, pp. 114–124, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.094.
- [5] H. A. Alalwan, A. H. Alminshid, and H. A. S. Aljaafari, "Promising evolution of biofuel generations . Subject review," *Renew. Energy Focus*, vol. 28, no. March, p. 13, 2019.
- [6] A. Tursi, "A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion," *Biofuel Res. J.*, vol. 6, no. 2, p. 962, 2019.
- [7] Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez, and J. Dávila-Rincón, "Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión," *Rev. Politécnica*, vol. 48, no. 2, pp. 7–20, 2021.
- [8] A. T. Ubando, C. B. Felix, and W.-H. Chen, "Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review," *Bioresour. Technol.*, vol. 299, p. 122585, 2020.
- [9] Y. Liu, R. Lin, Y. Man, and J. Ren, "Recent developments of hydrogen production from sewage sludge by biological and thermochemical process," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.

-
- 44, no. 36, pp. 19676–19697, 2019.
- [10] L. Montastruc, S. Belletante, A. Pagot, S. Negny, and L. Raynal, “From conceptual design to process design optimization: a review on flowsheet synthesis,” *Oil Gas Sci. Technol. d’IFP Energies Nouv.*, vol. 74, p. 80, 2019.
- [11] A. M. Blanco-Marigorta and J. D. Marcos, “Key issues on the exergetic analysis of H₂O/LiBr absorption cooling systems,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, p. 101568, 2021.
- [12] A. F. Galeano Osorio, “Limitaciones de los indicadores tradicionales de análisis financiero en las Pymes del sector metalmecánico de Manizales. Estudio de caso,” *Dep. Adm.*, 2011.
- [13] J. E. Silva *et al.*, “Energy potential and thermogravimetric study of pyrolysis kinetics of biomass wastes,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 137, no. 5, pp. 1635–1643, 2019.
- [14] N. Ayala-Ruíz, D. H. Malagón-Romero, and H. A. Milquez-Sanabria, “Exergoeconomic evaluation of a banana waste pyrolysis plant for biofuel production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 359, p. 132108, 2022.
- [15] R. Tavares, E. Monteiro, F. Tabet, and A. Rouboa, “Numerical investigation of optimum operating conditions for syngas and hydrogen production from biomass gasification using Aspen Plus,” *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 1309–1314, 2020.
- [16] C. Tangsathitkulchai, N. Punsuwan, and P. Weerachanchai, “Simulation of batch slow pyrolysis of biomass materials using the process-flow-diagram coco simulator,” *Processes*, vol. 7, no. 11, p. 775, 2019.
- [17] N. Deng, D. Li, Q. Zhang, A. Zhang, R. Cai, and B. Zhang, “Simulation analysis of municipal solid waste pyrolysis and gasification based on Aspen plus,” *Front. Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 64–70, 2019.
- [18] C. Jaroenkhasemmesuk, N. Tippayawong, S. Shimpalee, D. B. Ingham, and M. Pourkashanian, “Improved simulation of lignocellulosic biomass pyrolysis plant using chemical kinetics in Aspen Plus® and comparison with experiments,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 63, pp. 199–209, 2023.
- [19] C. Xia, L. Cai, H. Zhang, L. Zuo, S. Q. Shi, and S. S. Lam, “A review on the modeling and validation of biomass pyrolysis with a focus on product yield and composition,” 2021.
- [20] A. Arshad, H. M. Ali, A. Habib, M. A. Bashir, M. Jabbal, and Y. Yan, “Energy and exergy analysis of fuel cells: A review,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, pp. 308–321, 2019.
- [21] E. S. Dogbe, M. A. Mandegari, and J. F. Görgens, “Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process,” *Energy*, vol. 145, pp. 614–625, 2018.
- [22] Y. Cao *et al.*, “Feasibility investigation of a novel geothermal-based integrated energy conversion system: Modified specific exergy costing (M-SPECO) method and optimization,” *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 1124–1147, 2021.
- [23] S. Pinto-Altamiranda, J. S. A. Restrepo, M. E. González, O. D. Gutiérrez, and C. Barrera-Causil, “Influencia de los parámetros operacionales de carbonización hidrotermal asistida por microondas en la obtención de productos de valor energético: una revisión,” *TecnoLógicas*, vol. 25, no. 54, pp. e2265–e2265, 2022.
-



- [24] W. J. Martinez-Burgos *et al.*, “Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals,” *Bioresour. Technol.*, vol. 341, p. 125795, 2021.
- [25] G. Cruz, A. da L. P. Rodrigues, D. F. da Silva, and W. C. Gomes, “Physical–chemical characterization and thermal behavior of cassava harvest waste for application in thermochemical processes,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 143, no. 5, pp. 3611–3622, 2021.
- [26] H. Milquez-Sanabria, L. Blanco-Cocom, and L. Alzate-Gaviria, “A fast linear predictive adaptive model of packed bed coupled with UASB reactor treating onion waste to produce biofuel,” *Microb. Cell Fact.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [27] R. Elyaci, M. Bazarganipour, H. Tavanai, F. Esmaelion, and A. S. Shamsabadi, “Preparation and characterization of zinc oxide nanoparticles incorporated tragacanth nanofibers for adsorbing fuel sulfur compounds,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 576–583, 2022.
- [28] J. Szargut, “Energy and exergy analysis of the preheating of combustion reactants,” *Int. J. energy Res.*, vol. 12, no. 1, pp. 45–58, 1988.
- [29] M. Atienza-martínez, J. Ábrego, J. F. Mastral, J. Ceamanos, and G. Gea, “Energy and exergy analyses of sewage sludge thermochemical treatment,” *Energy*, vol. 144, pp. 723–735, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.007.
- [30] A. Lazzaretto and G. Tsatsaronis, “SPEC0 : A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems,” *Energy*, vol. 31, pp. 1257–1289, 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.03.011.
- [31] Q. Li, G. Song, J. Xiao, T. Sun, and K. Yang, “Exergy analysis of biomass staged-gasification for hydrogen-rich syngas,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 2569–2579, 2019.
- [32] N. Ramesh and S. Murugavelh, “A cleaner process for conversion of invasive weed (*Prosopis juliflora*) into energy-dense fuel: kinetics, energy, and exergy analysis of pyrolysis process,” *Biomass Convers. Biorefinery*, pp. 1–14, 2020.
- [33] Y. Zhang *et al.*, “Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 142, pp. 203–211, 2020.
- [34] A. Dhaundiyal and D. Atsu, “Exergy analysis of a pilot-scale reactor using wood chips,” *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123511, 2021.
- [35] M. A. Adnan, Q. Xiong, O. Muraza, and M. M. Hossain, “Gasification of wet microalgae to produce H₂-rich syngas and electricity: a thermodynamic study considering exergy analysis,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 2195–2205, 2020.

Gasificación Autotérmica a Escala Banco a Partir de Biomasa Residual Proveniente de Rastrojo de Sorgo

Bench Scale Autothermal Gasification from Waste Biomass of Sorghum Stubble

Lina Vanesa Garcia Peña

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina. Grupo de Investigación
Ciencia e Ingeniería en Sistemas Ambientales, Universidad del Cauca. Colombia.

linavgarciap@gmail.com

[ORCID: 0000-0002-7326-6235](https://orcid.org/0000-0002-7326-6235)

Agostina Quicchi

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad
Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina.

aquicchi@sanfrancisco.utn.edu.ar

[ORCID: 0000-0001-6369-1046](https://orcid.org/0000-0001-6369-1046)

Misael Cordoba Arroyo

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina. Grupo de Catálisis,
Universidad Del Cauca. Colombia.

mcordova@fiq.unl.edu.ar



[ORCID: 0000-0003-4003-8778](https://orcid.org/0000-0003-4003-8778)

María Eugenia Taverna

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química. Argentina.

Mariaeugeniataverna@gmail.com

[ORCID: 0000-0002-0991-201X](https://orcid.org/0000-0002-0991-201X)

Mariana Busto

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.

mbusto@fiq.unl.edu.ar

[ORCID: 0000-0002-5771-9978](https://orcid.org/0000-0002-5771-9978)

Mariana Bernard

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina.

Correo electrónico: mbernard@sanfrancisco.utn.edu.ar

[ORCID: 0000-0003-2525-9089](https://orcid.org/0000-0003-2525-9089)

Juan Manuel Badano

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.

jbadano@fiq.unl.edu.ar

[ORCID: 0000-0002-8181-4537](https://orcid.org/0000-0002-8181-4537)

Resumen

En este trabajo se estudió la caracterización, acondicionamiento y gasificación del rastrojo de sorgo para la obtención de gas de síntesis (syngas) mediante el uso de un reactor de lecho fluidizado burbujeante a escala banco y autotérmico. En este equipo se gasificó rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, var. M81) cuyo acondicionamiento, involucró diferentes etapas previas al proceso de gasificación como picado, secado y tamizado. Se realizaron determinaciones proximales, análisis elemental (CHON),

espectroscopia infrarroja (IR) y termogravimetría (TGA) de la materia prima. La gasificación se desarrolló en un sistema continuo con flujo másico de alimentación de 0,840 kg/h, 400 g de catalizador o sólido inerte, relación equivalente (ER: O₂ alimentado/O₂ estequiométrico) de 0,45 y temperatura de 600 °C. El syngas obtenido fue caracterizado para determinar: contenido de alquitrán, relación H₂:CO y poder calorífico inferior (LHV). Para esto, se sometieron muestras a SPA (Adsorción en Fase Sólida) y SPE (Extracción en Fase Sólida), luego se analizaron mediante cromatografía de gases (GC). En la gasificación se obtuvieron contenidos de alquitrán de 26 y 15 g/Nm³ con arena y dolomita, respectivamente; demostrando que el uso de catalizador reduce en un 40 % el contenido de alquitrán. Adicionalmente para ambas gasificaciones la relación H₂:CO y el LHV muestran valores similares de ~0,6 y 5,5 kJ/L, respectivamente. Los resultados indican que la gasificación continua, autotérmica y a escala banco de rastrojo de sorgo es una vía prometedora para la generación de bioenergía siendo atractivo desde el punto de vista ambiental y económico.

Palabras clave

Gasificación; Reactor Fluidizado; Catálisis, Rastrojo de Sorgo; Residuo Biomásico; Gas de Síntesis, Bioenergía.

Abstract

This work studied the characterization, conditioning and gasification of sorghum stubble to obtain syngas through the use of a bubbling fluidized bed reactor at a bench scale and autothermal. In this equipment, *Sorghum Saccharatum* stubble (V.M81) was gasified, whose conditioning involved different stages previously to the gasification process such as chopping, drying and sieving. Proximal determinations, elemental analysis (CHON), infrared spectroscopy (IR) and thermogravimetry (TGA) of the raw material were performed. Gasification occurred in a continuous system with a feed mass flow of 0,840 kg/h, 400 g of catalyst or inert solid, equivalent ratio (ER: fed O₂/stoichiometric O₂) of 0,45, and a temperature of 600 °C. The syngas obtained was characterized to determine: tar content,



H₂:CO ratio and lower heating value (LHV). For this, samples were processed by SPA (Solid Phase Adsorption) and SPE (Solid Phase Extraction), then they were analyzed by gas chromatography (GC). In the gasification, tar content values of 26 and 15 g/Nm³ were obtained with sand and dolomite, respectively demonstrating that the use of a catalyst reduces the tar content by 40%. For both gasifications, the H₂:CO ratio and the LHV show similar values of ~0,6 and 5,5 kJ/L, respectively. The results indicate that continuous, autothermal and bench scale gasification from sorghum stubble is a promising route for the generation of bioenergy, which is attractive from the environmental and economic point of view.

Keywords

Gasification; Fluidized Reactor; Catalysis, Sorghum Stubble; Waste Biomass; Syngas; Bioenergy.

Introducción

En la actualidad se llevan adelante grandes esfuerzos a nivel mundial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la implementación de energías renovables, que están orientadas a disminuir la dependencia a los combustibles fósiles. Lo anterior se ha planteado desde la bioeconomía, que tiene por principio la utilización o reutilización de recursos renovables y/o residuos de otros procesos para generación de bienes y servicios [1]. En este contexto, es evidente que la transición energética es una necesidad y un proceso de transformación de las formas de producción, distribución y consumo de energía para hacer sostenible el sistema energético. Es así, como los residuos biomásicos se pueden considerar como una alternativa energética viable para generar biocombustibles de segunda generación y con estos producir bioenergía [2].

En el 2019 la participación de la bioenergía a nivel mundial fue de 12,5 % de los cuales el 90 % de la materia prima bioenergética fueron materiales lignocelulósicos como la madera y residuos de diferentes cereales como el sorgo, trigo y arroz [3]. En Argentina, si bien, el 59%

de la energía se obtiene a partir de combustibles fósiles, se están llevando a cabo distintas acciones y proyectos con el fin de fomentar la producción de energías renovables, las cuales en la actualidad representan un 12 % de la matriz energética nacional con un 4 % correspondiente a energía a partir de biomasa, principalmente lignocelulósica proveniente de la agroindustria[4]. Es así, como cada vez se aprovechan más los residuos biomásicos generados en las cadenas productivas tanto del sector agroindustrial como agrícola. De acuerdo con lo anterior, en el periodo del 2020-2021 en Argentina se sembró una superficie de aprox. 985.500 ha de sorgo de las cuales un 15,60 % corresponde a la provincia de Córdoba [5]. Es importante destacar, que el sorgo impacta de manera positiva la calidad del suelo dado que mejora su porosidad debido al aporte de carbono que ayuda a equilibrar el suelo y al mismo tiempo, mejora la eficiencia de aprovechamiento de agua [6]. Hay diferentes variedades de sorgo, como el azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), el cual es sembrado para ser utilizado como cortina forestal por lo que tiene la particularidad de superar dos metros de altura, desarrollando poca panoja, aportando mayor cantidad de biomasa por hectárea sembrada y tiene la capacidad de adaptarse a diferentes situaciones edafoclimáticas (sequías, salinidad del suelo, etc) [7]. Además, este cultivo no se utiliza con fines alimenticios, ni compite por tierra con otras especies alimenticias. Sin embargo, el rastrojo de sorgo tiene baja densidad y alto contenido de humedad (65-70%) [7]; por lo tanto, es crucial el acondicionamiento de este material. El proceso de acondicionamiento implica diferentes etapas, tanto en el campo de siembra como en planta piloto, donde se lleva a cabo un proceso de secado, picado y tamizado.

Para la transformación de la biomasa en biocombustibles hay diferentes rutas, entre las que se tienen los procesos de termoquímicos de conversión como la pirólisis, combustión y gasificación. Esta última es un proceso termoquímico de combustión incompleta en donde la biomasa y el agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua) son puestos en contacto para dar paso a procesos como el secado, volatilización, reacciones de oxidación, craqueo



y reformado; generando en mayor proporción un gas de síntesis (syngas) compuesto de H₂, CH₄, CO, CO₂ e hidrocarburos ligeros o pesados, conocidos como alquitrán (tar). A partir de este gas se pueden generar diferentes productos químicos, energía térmica y eléctrica. Para estas últimas aplicaciones se debe acoplar a un sistema de calderas, motores de combustión interna y/o turbinas de gas [8]. Adicionalmente, en el proceso de gasificación se genera un residuo carbonoso conocido como biochar que puede utilizarse como material filtrante en tratamiento de aguas y como mejorador de las propiedades higroscópicas del suelo [9].

La eficiencia energética de la tecnología de gasificación puede alcanzar valores superiores al 50%, dependiendo de la calidad de la biomasa, agente gasificante y tipo de reactor [10]. Hay diferentes tipos de reactores como los de lecho fijo, arrastre y fluidizado; este último permite un buen control de temperatura y presión, una alta capacidad de procesamiento, genera un syngas con contenido de alquitrán medio-bajo y la posibilidad de ser aplicado a diferentes escalas para generación de energía eléctrica en plantas de entre 10-100 kW [11]. Diversos autores centran sus esfuerzos en el estudio de combustibles biomásicos y aunque los procesos de gasificación han sido más abordados para el procesamiento de biomasa a partir de la industria maderera, se reconoce que otros materiales de tipo lignocelulósicos pueden también ser ampliamente utilizados. Publicaciones recientes como las de Pienihäkkinen et al. [12], estudiaron la pirólisis rápida de diversas biomasa como el rastrojo de sorgo. Afshin Amani y Faranak Akhlaghian [13], orientaron su estudio hacia la cogasificación de sorgo con lignito para la producción de hidrógeno, mientras que Olivera S. Stamenković et al. [14], profundizaron en el estudio del ciclo de vida y la generación de subproductos obtenidos a partir del grano de sorgo.

En este trabajo se estudió la caracterización, acondicionamiento y gasificación del rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), dada la baja cantidad de estudios relacionados con la gasificación de esta biomasa, además de las mejoras que este cultivo confiere al suelo. Para la gasificación se utilizó un sistema a escala banco con reactor de lecho fluidizado burbujeante y autotérmico; en el cual se utilizó un catalizador natural de

dolomita (Dol) y arena (blanco) para determinar el contenido de alquitrán, relación H₂:CO y poder calorífico inferior (LHV) del syngas con el propósito de evaluar la tecnología de gasificación de residuos biomásicos como el rastrojo de sorgo para la generación de un syngas con potencial bioenergético.

Materiales y métodos

Acondicionamiento y caracterización del catalizador

Durante las pruebas de gasificación catalítica se utilizó como catalizador la dolomita (Dol), la cual fue provista por José Luis Calvo-Explotación Minera. Previo a su uso, fue calcinada en aire a 700 °C por 24 h. El catalizador y material inerte (arena) usados en el reactor lecho fluidizado fueron tamizados en un tamaño de partículas de 0,25 -0,50 mm. Se utilizaron técnicas de caracterización para conocer algunas propiedades de Dol como la espectroscopia acoplada a plasma inductivo (ICP-OES) en un equipo Perkin Elmer OPTIMA 2120 para determinar el contenido metálico y la técnica de fisisorción de N₂ en un Micromeritics ASAP 2020 para conocer sus parámetros texturales como el área superficial.

Acondicionamiento y caracterización del rastrojo de sorgo

La biomasa utilizada fue el rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, variedad M81), provisto por INTA (Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria, Argentina) (**Figura 1a**). Previo a la gasificación, se sometió al proceso de acondicionamiento para obtener el tamaño de partícula adecuado para el reactor de gasificación.

La biomasa tras ser cosechada, se picó en campo utilizando una picadora autopropulsada con la cual se llevó a un tamaño de partícula de 18-40 mm. El material se almacenó a granel para su proceso de secado en un secador piloto de lecho fluido en el que se logró disminuir la humedad de 60% a valores menores al 10% con un tiempo de secado de 2 h a 120 °C. Una vez seco el material se prosiguió a la reducción de tamaño con un molinillo de hélice



que opera a un rango de molienda de 30-300 mesh, velocidad de rotación de 28.000 rpm y tiempo de molienda de 5 min. Finalmente se tamizo manualmente con lo que se obtuvo un material de 0,50-0,84 mm; tal como se requiere en el gasificador a utilizar (**Figura 1b**).

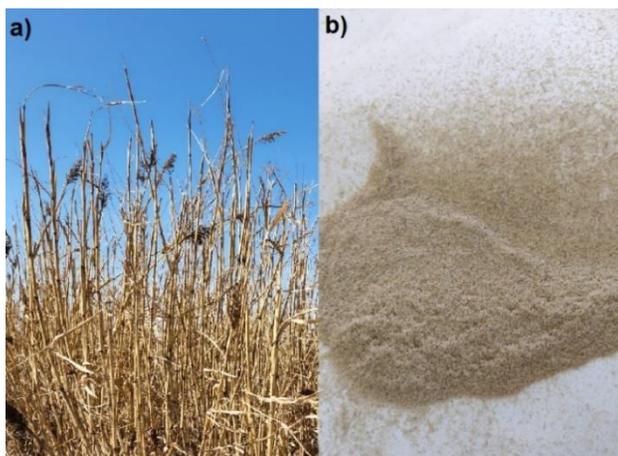


Figura 1. (a) *Sorghum Saccharatum*, V. M81 previo a la cosecha. (b) Rastrojo de sorgo acondicionado para gasificación.

La caracterización del rastrojo de sorgo involucró la determinación del análisis elemental mediante la técnica de análisis elemental (CHON) en un equipo CHN628 and Sulfur Add-On Module and TruSpec Micro Oxygen Add-On Module Elemental Determinators, marca: LECO®. El análisis próximo donde se determina el contenido de humedad (ASTM D 3173-03), material volátil (ASTM E 872-82), cenizas (ASTM D 1102 – 84) y carbono fijo por diferencia. Además, de determinar su comportamiento térmico con flujo oxidante; mediante el análisis de termogravimetría (TGA) en un equipo Mettler Toledo STARE con módulo TGA/SDTA851 y se identificaron los grupos funcionales a través del análisis de espectroscopia infrarroja con reflectancia difusa (DRIFT) en un equipo Shimadzu Affinity 1S.

Pruebas de gasificación

Se estudió la gasificación del rastrojo de sorgo en un sistema a escala banco, continuo y autotérmico de lecho fluidizado (**Figura 2**). Está compuesto por la unidad de alimentación de la biomasa (1 y 2) y de los agentes gasificantes (4 y 5), pasando por el reactor de

gasificación de lecho fluidizado autotérmico (6), seguido de la unidad de retención de partículas (8 y 9), el acondicionamiento de gases (10) y la medida volumétrica del gas (11).

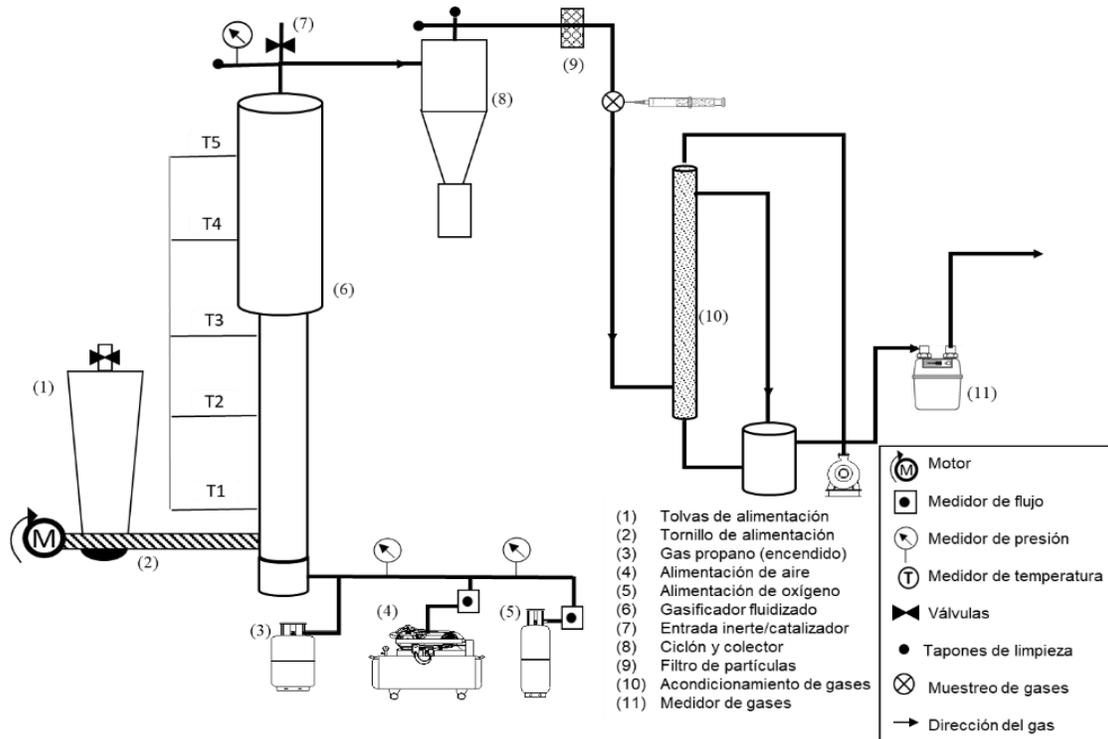


Figura 2. Esquema del sistema de gasificación a escala banco.

Las pruebas se realizaron con un flujo de alimentación de 0,840 kg/h, 400 g de catalizador/inerte y una relación equivalente (ER: relación entre el oxígeno alimentado y el requerido estequiométricamente para una combustión completa) de 0,45 con temperatura de equilibrio de 600°C. En la **Figura 3**, se muestra el diagrama de flujo con los pasos que conforman la prueba de gasificación.



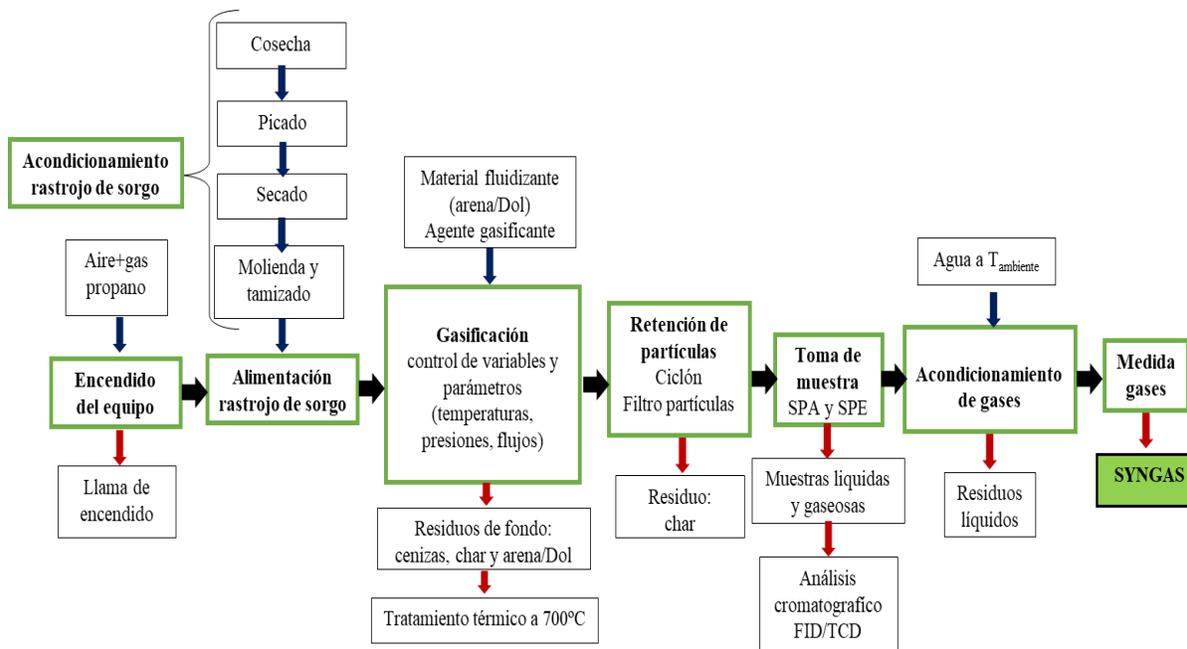


Figura 3. Diagrama de flujo de prueba de gasificación.

Durante la gasificación se toman y procesan las muestras por la técnica de SPA (Adsorción en Fase Sólida) y SPE (Extracción en Fase Sólida), seguido de un análisis por cromatografía de gases con detector FID/TCD Shimadzu 2014. Los datos obtenidos permiten determinar contenido de alquitrán, composición de gas, relación $H_2:CO$ y poder calorífico inferior (LHV) a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Composición gas (\%)} = [N_i/N_t] * 100 \quad (1)$$

$$\text{Relación } H_2:CO = \text{moles } H_2 \text{ generado/moles } CO \text{ generado} \quad (2)$$

$$LHV \left(\frac{MJ}{Nm^3} \right) = \sum X_i * LHV_i \quad (3)$$

Donde:

N_i : Flujo molar i en el producto gaseoso (mol/h).

N_t : Flujo molar total de gases generados (mol/h).

LHV: poder calorífico inferior (MJ/Nm^3 : kJ/L).

X_i : Fracción molar i en el producto gaseoso.

LHV_i : poder calorífico inferior (MJ/Nm^3 : kJ/L)

Resultados

Caracterización del catalizador y rastrojo de sorgo

El **Cuadro 1** [15] presenta el contenido metálico y propiedades texturales para Dol, se observa que los resultados son conformes a la naturaleza química del mineral, con componentes principales como el CaCO_3 , MgCO_3 , MgO y CaO . Dol presenta baja área BET y tamaño de poro muy bajos.

Cuadro 1. Resultados ICP y parámetros texturales del catalizador (Dol).

ICP: Elemento (%)		Propiedades Texturales		
Ca	Mg	Vol _{poro} (cm^3/g)	Vol _{poro} (cm^3/g)	d _{poro} (nm)
21,4	12	5,7	0,006	4,5

Fuente: [15]

En el **Cuadro 2**, se presentan algunas características del rastrojo de sorgo usado como alimentación. Estos resultados de caracterización se emplearon para comprender la naturaleza de la biomasa y establecer pautas operativas en el proceso de gasificación.

Cuadro 2. Caracterización del rastrojo de sorgo.

Material volátil (%)	Carbón fijo (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)	Densidad (g/ml)	Análisis Elemental (%)				Poder calorífico (kJ/kg)	
					C	H	O	N	HHV	LHV
83,97	2,20	3,19	10,64	0,19	43,5	5,6	50	0,7	16390	15229

En la **Figura 4**, se muestran las curvas TGA y DTG del sorgo en aire. Se observa una primera región de 30-150°C, que corresponde a la etapa de secado. Seguido, hay dos regiones de descomposición; una correspondiente a la hemicelulosa, celulosa y lignina que esta entre



200-350°C y que en la curva DTG corresponde al segundo pico el cual tiene su máximo valor ~290°C. La segunda región corresponde a la descomposición del char que se degrada 350-500°C con un máximo en ~430°C [16]. Este análisis nos permite determinar que la temperatura de autoignición del sorgo es ~ 290°C, lo cual es determinante para el sistema de encendido del reactor autotérmico.

En la **Figura 5** se observa el espectro DRIFT del rastrojo de sorgo. Se evidencia una banda débil y solapada entre 3300 a 3100 cm^{-1} correspondiente al estiramiento del grupo hidroxilo O-H. Además, se observan vibraciones características entre 2900-2700 cm^{-1} de los enlaces C-H de cadenas alifáticas, estas bandas pueden ser atribuidas a la presencia de carbohidratos y proteínas. Los picos alrededor de 1700-1600 cm^{-1} son atribuidos a la lignina con vibración correspondiente al estiramiento C-O conjugado del anillo aromático y las bandas entre 1200 a 900 cm^{-1} son correspondientes a vibraciones de enlaces C-O, C-O-H, C-C las cuales se atribuyen a la presencia de celulosa y hemicelulosa del rastrojo de sorgo [17].

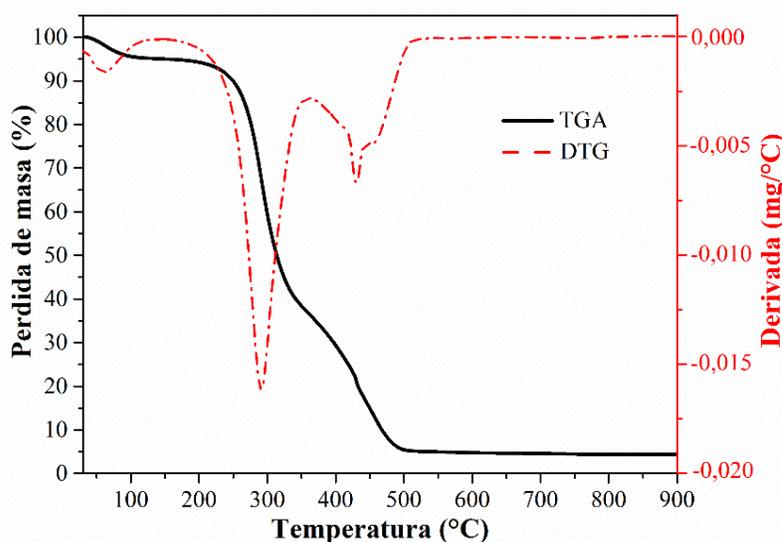


Figura 4. TGA rastrojo de sorgo en flujo de aire.

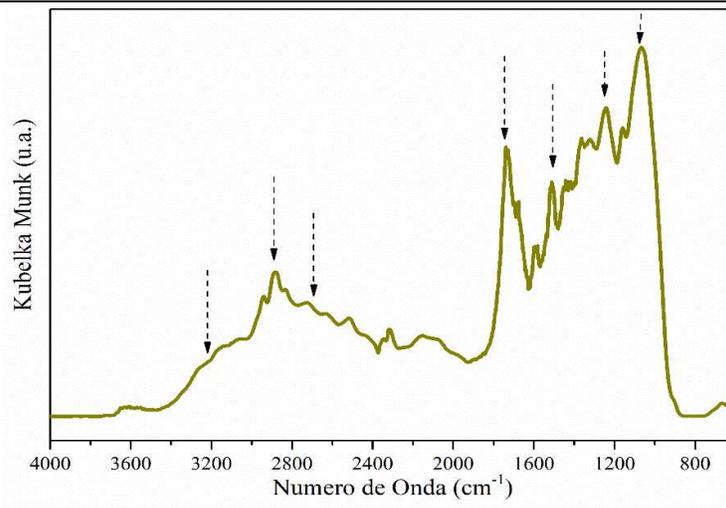


Figura 5. Espectro DRIFT del rastrojo de sorgo.

Pruebas de gasificación catalítica

Las pruebas de gasificación se realizaron con un flujo másico de rastrojo de sorgo de 0,840 kg/h, usando 400 g de material inerte o catalizador (Dol) en el lecho fluidizado, con un ER: 0,45 para una temperatura de gasificación de 600 °C. Como se observa en el **Cuadro 3**, el contenido de alquitrán es de 26 y 15,3 g/Nm³ para Dol y arena, respectivamente; lo que evidencia que el catalizador Dol presenta una mejor actividad durante la gasificación en comparación con el blanco (arena). Lo anterior, podría estar atribuido a las características encontradas en el catalizador de dolomita (**Cuadro 1**) donde se aprecia la presencia de calcio y magnesio que podrían estar en forma de carbonatos u óxidos, favoreciendo el craqueo catalítico de diferentes moléculas de alquitrán por la naturaleza básica del catalizador [18]. También se observa menos generación de biochar durante la gasificación catalítica con Dol en comparación con la arena, que puede deberse a reacciones favorecidas en presencia de Dol como la reacción de Boudouard ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$) y la de gasificación de char ($C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$); lo que a su vez incrementan los rendimientos del syngas.



Cuadro 3. Resultados de las pruebas de gasificación del rastrojo de sorgo

Prueba	Arena	Dol
Alimentación (Kg/h)	0,84	0,84
T equilibrio (°C)	600	600
ER	0,45	0,45
Contenido de alquitrán (g/Kg biomasa)	35,4	22,9
Contenido de alquitrán (g/Nm³)	26,0	15,3
Rendimiento gas total (Nm³/Kg biomasa)	1,36	1,50
Rendimiento de syngas (Nm³/Kg biomasa)	0,91	1,05
H₂ (%)	11	13
CO (%)	21	22
CH₄ (%)	4	3
CO₂ (%)	18	15
H₂:CO	0,52	0,59
LHV (kJ/L)	5,6	5,5
biochar %	11	8

En cuanto a la composición porcentual de los gases (H₂, CO, CO₂ y CH₄), la relación H₂:CO y el poder calorífico inferior (LHV) son muy similares entre la gasificación catalítica con Dol y la de referencia en modo no catalítico (arena). Destacando que el LHV es de ~5,5 kJ/L, siendo este un valor aceptable para la gasificación de residuos biomásicos como el rastrojo de sorgo utilizando como agente gasificante una mezcla de aire con oxígeno. Los resultados evidencian el potencial en aplicaciones bioenergéticas que puede tener el syngas generado a partir de la gasificación de este tipo de residuo biomásico.

Conclusiones

Se caracterizó y estableció el procedimiento para acondicionamiento del rastrojo *Sorghum Saccharatum* V.M81; involucrando picado en campo, secado en planta piloto, una segunda etapa de picado y tamizado para obtener el tamaño de partícula para la gasificación.

La prueba de gasificación del rastrojo de sorgo en modo catalítico con Dol mostro una disminución del 40% en el alquitrán del syngas comparado con el obtenido en modo no catalítico (arena); lo anterior puede ser atribuido a la naturaleza básica del catalizador Dol que favorece algunas reacciones, además se reconoce el bajo costo de este mineral y que no requiere procesos de síntesis catalítica, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.

Se estudió la gasificación del rastrojo de sorgo en un sistema a escala banco, continuo y autotérmico, utilizando como agente gasificante una mezcla de aire y oxígeno con lo que se obtuvo un syngas con un LVH de 5,5 kJ/L; evidenciando la posibilidad de usar esta tecnología para la gasificación del rastrojo de sorgo. Además, se destaca el uso de un cultivo que aporta gran cantidad de biomasa por hectárea, que puede ser sembrado en tierras agrestes y que no compite por el uso de tierra con cultivos alimenticios. Al contrario, complementa los esquemas de siembra realizando protección contra la erosión, aporte de nutrientes al suelo y una posibilidad concreta de generación de energía, contribuyendo a la independencia energética de poblaciones aisladas e impulsando la transición energética.

Agradecimientos

A CONICET, Universidad Nacional del Litoral y ANCyT Santa Fe-Argentina por el apoyo financiero (PICT 2019-02065, CAI+D 50620190100103LI y IO-2018-00154). A Diego Sologuren por su apoyo técnico en la construcción del equipo. A la empresa Jose Luis Calvo-Explotación Minera por la dolomita. Al Ing. Diego Mathier, Ing. Diego Ortiz e Ing. Marcos Bragachini de INTA, estación experimental Manfredi por la siembra y provisión de la materia prima. A UTN, FRSFco, por el financiamiento mediante el proyecto PID ENPPBSF0008448.



Referencias

- [1] A. Akbarian, A. Andooz, E. Kowsari, S. Ramakrishna, S. Asgari, y Z. A. Cheshmeh, "Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy", *Bioresour Technol*, vol. 362, pp. 127774, 2022. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127774.
- [2] A. Molino, V. Larocca, S. Chianese, y D. Musmarra, "Biofuels production by biomass gasification: A review", *Energies*, vol. 11, n. 4, 2018. doi: 10.3390/en11040811.
- [3] J. Bandara et al. "Air gasification of wood chips, wood pellets and grass pellets in a bubbling fluidized bed reactor", *Energy*, vol. 233, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.121149.
- [4] M. Eléctrico Mayorista, «Informe Anual 2021», 2022.
- [5] MAGyP, Presidencia de la Nación Argentina «Estimaciones agrícolas», 2021. Recuperado de: <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- [6] S. K. Truong et al. "Bioenergy sorghum crop model predicts VPD-limited transpiration traits enhance biomass yield in water-limited environments", *Front Plant Sci*, vol. 8, 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.00335.
- [7] L. Giorda y J. Colazo, "Biomasa Energética de Sorgo en Ubajay (Entre Ríos). INTA Manfredi y el Sorgo: Nuevos Desarrollos".
- [8] M. Rahman, "Test and performance optimization of nozzle inclination angle and swirl combustor in a low-tar biomass gasifier: a biomass power generation system perspective", *Carbon Resources Conversion*, vol. 5, n. 2, pp. 139-149, 2022. doi: 10.1016/j.crcon.2022.01.002.
- [9] F. R. Oliveira et al. "Environmental application of biochar: Current status and perspectives", *Bioresour Technol*, vol. 246, pp. 110-122, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.122.
- [10] Z. Yao et al. "Biomass gasification for syngas and biochar co-production: Energy application and economic evaluation", *Appl Energy*, vol. 209, pp. 43-55, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.077.
- [11] T. Phong Mai y D. Quan Nguyen, "Gasification of Biomass", en *Biotechnological Applications of Biomass*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.93954.
- [12] E. Pienihäkkinen et al., "Valorization of Eucalyptus, Giant Reed Arundo, Fiber Sorghum, and Sugarcane Bagasse via Fast Pyrolysis and Subsequent Bio-Oil Gasification", *Energy & Fuels*, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c01968.
- [13] A. Amani y F. Akhlaghian, "Hydrogen production from co-gasification of lignite and sorghum biomass in a fixed-bed gasifier: CFD modeling", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, n. 1, pp. 295-304, 2022, doi: 10.1007/s40095-021-00423-y.
- [14] O. S. Stamenković et al. "Production of biofuels from sorghum", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, pp. 109769, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109769.

-
- [15] L. Garcia et al “Catalytic Steam Reforming of Biomass Tar Model Compounds with Low-Cost Catalysts: Effect of Operation Conditions”, *Top Catal*, vol. 65, pp. 1382-1393, 2022. doi: 10.1007/s11244-022-01659-6.
- [16] N. R. Galina et al. “Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis”, *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, n. 3, pp. 741-754, 2019, doi: 10.1016/j.joei.2018.02.008.
- [17] D. Kotaiah Naik et al. “Pyrolysis of sorghum bagasse biomass into bio-char and bio-oil products”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 127, n.2, pp. 1277-1289, 2017, doi: 10.1007/s10973-016-6061-y.
- [18] M. Islam, “A review of dolomite catalyst for biomass gasification tar removal”, *Fuel*, vol. 267, pp. 117095, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117095.



Evaluación Energética, Exergética y Económica (3E) en planta de incineración directa de residuos urbanos con generación eléctrica

Energetic, Exergetic and Economic (3E) assessment of a direct municipal waste incineration plant with electricity generation

Nilson Yulian Castillo León

Unidades tecnológicas de Santander. Colombia

nycastillo@correo.uts.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-4552-345X>

Brayan Eduardo Tarazona Romero

Unidades tecnológicas de Santander. Colombia

btarazona@correo.uts.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-6099-0921>

Javier Gonzalo Ascanio Villabona

Unidades tecnológicas de Santander. Colombia

jascanio@correo.uts.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-1749-5399>

Carlos Gerardo Cardenas Arias

Unidades Tecnológicas de Santander. Colombia

ccardenas@correo.uts.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-4447-5828>

Resumen

El crecimiento industrial de países en vía de desarrollo enfrenta desafíos económicos, sociales y ambientales, íntimamente relacionados con el aseguramiento de la demanda energética. Este estudio relaciona los anteriores aspectos por medio de la tecnología basura a energía (WtE); propiamente, la incineración directa de residuos con un enfoque de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU), que permite utilizar parte de la problemática como fuente de solución. Se realizó una evaluación Energética y Exergética en una configuración convencional de ciclo Rankine desde un enfoque analítico, calculados los rendimientos energéticos y exergéticos de planta, se definieron los supuestos financieros para desarrollar el análisis económico. Los parámetros de vapor se estimaron en 40 bar y 380°C. Con un PCI de los RSU de 8,786 kJ/kg, la eficiencia energética y exergética se calculó en 22.6% y 20.37% respectivamente, entregando a la red 87.4 GWh de energía eléctrica por año y una Exergía destruida de 58 MW. Un periodo de recuperación de la inversión de 19.7 años, valor presente neto (VPN) de \$ 5.880.477 USD, tasa interna de retorno (TIR) de 11.16% y un costo nivelado de electricidad (LCOE) de 190.14 USD/MWh.

Palabras claves

Análisis de Exergía; Costo nivelado de electricidad; Evaluación Energética; Incineración directa Residuos sólidos urbanos.

Abstract

The industrial growth of developing countries faces economic, social and environmental challenges, intimately related to the assurance of the energy demand. This study relates the above aspects by means of the WtE technology, properly speaking, the direct incineration



of waste with an approach to MSW management, which allows using part of the problem as a source of solution. An energetic and exergetic evaluation was carried out in a conventional Rankine cycle configuration from an analytical approach, calculated the energetic and exergetic yields of the plant, the financial assumptions were defined to develop the economic analysis. Steam parameters were estimated at 40 bar and 380°C. With an MSW lower heating value (LHV) of 8,786 kJ/kg, the energy and exergy efficiency was calculated at 22.6% and 20.37% respectively, delivering 87.4 GWh of electrical energy per year to the grid and an Exergy destroyed of 58 MW. A payback period of 19.7 years, net present value (NPV) of \$ 5,880,477 USD, internal rate of return (IRR) of 11.16% and a levelized cost of electricity (LCOE) of 190.14 USD/MWh.

Keywords

Direct Incineration Municipal Solid Waste; Energy Assessment; Exergy Analysis; Levelized Cost of Electricity

Introducción

Alcanzar la prosperidad industrial es la meta de los países en vía de desarrollo- Uno de sus principales objetivos es asegurar la demanda energética, diversificando sus fuentes de energía desde un enfoque sostenible. No obstante, el crecimiento económico y poblacional, deriva en mayores tasas de consumo que a su vez representan incrementos en la generación de residuos sólidos urbanos que ameritan una gestión y procesamiento adecuado para evitar afectaciones al medio ambiente y problemáticas sociales. A nivel mundial la generación desmedida de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha convertido en un desafío. En el 2016 se generaron alrededor de 2,010 millones de toneladas de RSU y se espera que en el 2030 y 2050 el mundo alcance a generar 2,590 y 3,400 millones de toneladas de RSU respectivamente. en la actualidad un 40% de las basuras son eliminadas en vertederos controlados y un 30% en vertederos a cielo abierto [1], siendo este método de disposición, la última opción en la jerarquía para el tratamiento sostenible de basuras [2] y considerado una fuente de gases efecto invernadero 20 veces más potente que el

dióxido de carbono (CO₂) debido al metano (CH₄) contenido en el biogás [3]. Se estimó que en el 2026, 1.600 millones de toneladas de CO₂ equivalentes, se generarían de la gestión de RSU, siendo alrededor del 5% del total mundial de emisiones [1]. Los gases de vertederos contienen trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV) que son potencialmente perjudiciales para la calidad del aire y la salud humana[4][5] lo que requiere una alternativa para la gestión de las basuras. Esto abre el espacio a tecnologías WtE tales como la incineración directa de RSU, la cual disminuye en un 90% el volumen de los residuos y en un 75% el peso específico de los mismos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo y el agua en comparación de los vertederos actuales [6][7] y generando energía eléctrica parcialmente renovable (combustible biomasa de RSU), fortaleciendo de esta manera la seguridad energética y diversificando las fuentes de combustible primario [8][9].

La valorización energética de los RSU por medio de tratamientos térmicos (incineración, pirólisis y gasificación), se ha desarrollado con vertiginosidad, motivado, principalmente por la eliminación higiénica de residuos, producción de energía renovable y reducciones de impactos ambientales [10][11]. Actualmente, la incineración directa de residuos representa la tecnología de mayor madurez, probada en más de 1,180 plantas, las cuales operan en 40 países a nivel mundial; procesan aproximadamente 11% de los RSU generados en todo el mundo y producen un total de 429 TWh de energía eléctrica por año [12][13] con tendencias a aumentar la capacidad instalada en un 500% para la próxima década según estimaciones de la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) [9]. La incineración implica una quema directa y controlada de basuras en presencia de oxígeno para generar cenizas, gases de combustión y calor que se utiliza para producir electricidad. Durante el proceso, los gases de combustión alcanzan una temperatura de al menos 850°C durante 2s para garantizar una descomposición adecuada de las sustancias orgánicas tóxicas [14]. Sin embargo, la cantidad de energía recuperada de la combustión de residuos varía significativamente con las



características de los RSU (composición, flujo de masa, frecuencia y PCI), la tecnología de combustión, las diferentes configuraciones y los parámetros del ciclo de vapor. La corrosión sigue siendo el problema principal en la caldera de RSU. Desafortunadamente los procesos de corrosión tienen una naturaleza múltiple, cambian con el tiempo según la composición de los RSU y están estrictamente relacionados con los parámetros de vapor, siendo estos, penalizados a 380°C y 40 bar. Así, la presión y la temperatura en el generador de vapor, marca la generación de corrosión en los haces de tubos de la zona convectiva de la caldera, restringiendo la eficiencia del ciclo alrededor del 20 y 25%, siendo superadas, en comparación con las eficiencias de los ciclos térmicos que utilizan combustible fósil, como el carbón (35-40%) [15][16][17] [18].

En respuesta al crecimiento y madurez de esta tecnología a nivel mundial, la comunidad científica y los industriales han realizado investigaciones enfocadas en definir rendimientos energéticos y factibilidades de planta. En Malasia Tan et al, analizaron la gestión de residuos, comparando las tecnologías de incineración y gasificación: se obtuvieron mejores rendimientos energéticos y económicos para la incineración, no obstante, estos resultados pueden variar en función del tipo de residuos, así como de la escala y la eficiencia del sistema y de la región estudiada [19]. Lino e Ismail, llegaron a la conclusión de que la electricidad generada mediante esta práctica podría abastecer hasta 135.680 casas y generar ingresos de aproximadamente 5,8 millones de dólares al mes [19]. Según Dalmo et al, la implementación de plantas de incineración de RSU en el estado de Sao Paulo, podría generar hasta 5,7 TWh, un potencial capaz de satisfacer el 79% de la demanda energética del estado. La incineración de residuos en sólo 16 grandes ciudades brasileñas podría sustituir el 1,8% del consumo total de electricidad doméstica en todo Brazil [20].

Otro grupo de estudios se ha enfocado en incrementar las eficiencias del ciclo por medio de sistemas combinados o híbridos. Pan, propuso en su estudio, un diseño híbrido que combina la gasificación de residuos y la generación de energía a carbón, donde los RSU se introducen en el gasificador de plasma y se convierten en gas de síntesis que se aprovecha

para la producción de electricidad a través del ciclo de vapor de la central eléctrica de carbón alcanzando una eficiencia neta de conversión de residuos en electricidad del 35,16% en el diseño híbrido [21]. En otro estudio Pan y colaboradores, proponen un ciclo orgánico de Rankine y un ciclo de refrigeración por absorción para mejorar tanto la eficiencia energética y exergética, el análisis de destrucción de exergía muestra que la tasa de destrucción de exergía de la caldera disminuye al 48,41% después de agregar el sistema de recuperación de calor residual, pero los condensadores necesitan mejoras adicionales para lograr su menor eficiencia de exergía [22]. Carneiro y demás, evaluaron el desempeño energético, exergético, económico y ambiental, integrando configuraciones de ciclos combinados de doble combustible, turbinas de gas / residuos en energía [23].

No menos importante, y debido a la resistencia social, las plantas de incineración requieren un sistema de control y tratamiento de los gases de escape, lo que conlleva unos costes elevados. La reducción de las emisiones peligrosas de la incineración es un tema constantemente investigado en la literatura. Como ejemplo, podemos citar a Silva et al. (2019) [24] quienes propusieron un modelo de reactor que combina la pirólisis y la incineración alimentada por una mezcla de RSU y astillas de madera, logrando minimizar las emisiones de compuestos como el HCl, las dioxinas y los furanos, por debajo de los estándares legales de Brasil y de otros indicadores medioambientales internacionales. Montagnana y Ferreira concluyeron por medio de análisis de ciclo de vida, que la incineración ofrece mejores réditos económicos cuando se realiza recuperación energética y condiciones técnicas que aseguren la sostenibilidad ambiental del proyecto [25][26]. Estas innovaciones son importantes para el futuro de la incineración y la generación de energía a partir de los RSU. Una revisión de la evolución y la mejora de los métodos de tratamiento de efluentes gaseosos en las plantas de incineración en las últimas décadas se pueden encontrar en el estudio de Makarichi y colaboradores [13].



Como consecuencia de estos elevados costes, esta tecnología no está implantada a nivel mundial, por lo que se concentra principalmente en tres regiones del mundo: Europa, Asia y América del Norte. No obstante, el potencial de la incineración en otras regiones del mundo es posible, motivo por el cual se presenta este estudio, teniendo como objetivo, evaluar rendimientos de planta con alcances de primera y segunda ley de la termodinámica, determinando indicadores económicos que sirvan como punto de partida para nuevos investigadores y tomadores de decisiones que pretendan la implementación de esta tecnología en sus ciudades. Como valor agregado, este estudio no utilizó un software comercial especializado, los cuales suelen ser costosos e inaccesibles para estudiantes o investigadores de instituciones educativas menos privilegiadas. Por el contrario, los resultados de este estudio se alcanzaron desde un enfoque analítico, permitiendo observar las metodologías, supuestos y ecuaciones utilizadas. Para el ejercicio numérico se caracterizó como escenario de referencia, una planta de tamaño mediano con capacidad de 66 MWt, cantidad de residuos que puede ofrecer la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana. Potencia eléctrica de turbina de vapor de 15 MW, parámetros moderados de ciclo de vapor de 40 bar y temperatura de 380°C.

Metodología

Este estudio tiene por objetivo evaluar desde un enfoque energético, exergético y económico los rendimientos de una planta WtE-MSWI. En la figura 1 se puede observar la metodología utilizada en el análisis termodinámico. Esta metodología de análisis y diagnóstico es considerada en el diseño de soluciones alternativas que buscan reducir la utilización innecesaria de recursos, alcanzando impactos positivos en el aspecto económico, ambiental y tecnológico en búsqueda del desarrollo sostenible. En el presente estudio, se realizó un análisis energético, del cual se obtuvo la eficiencia térmica de primera ley, junto a otros parámetros útiles del sistema evaluado. Posteriormente, se realizó un análisis de exergía convencional para determinar la eficiencia exergética del ciclo, los componentes del sistema con mayor destrucción de exergía y los procesos que la causan. Los supuestos de

los cálculos son: (I) El sistema opera en estado estacionario; (II) Cada componente del sistema se analiza como un volumen de control; (III) Las variaciones de energía cinética y potencial son insignificantes; (IV) Se tiene en cuenta el mayor consumo interno de electricidad; (V) No se consideran las pérdidas mecánicas y eléctricas en la turbina y el generador eléctrico, el purgado de la caldera, la combustión incompleta y las pérdidas de vapor de las juntas; (VI) no se consideran las caídas de presión en calderas y tuberías.

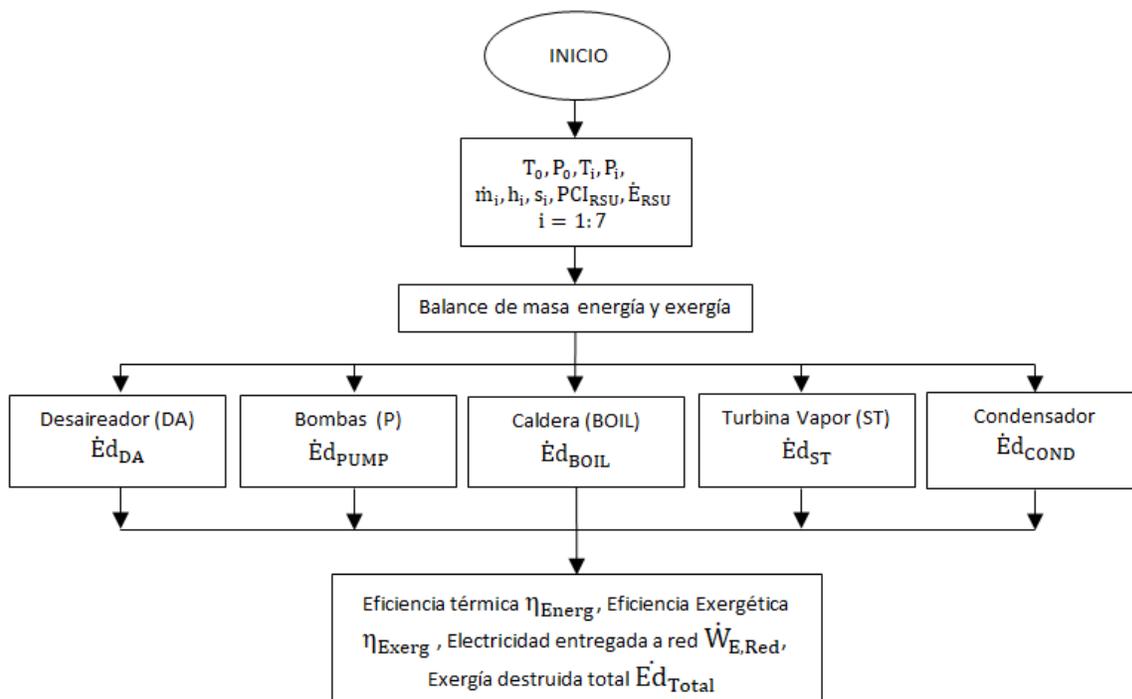


Figura 1. Metodología análisis energético y exergético

Caso de estudio

El valor energético de los RSU depende de su contenido de humedad y composición. La recuperación de energía por tonelada de desechos dependerá del poder calorífico inferior PCI, la eficiencia de la caldera y el producto final, ya sea en forma de vapor o electricidad. El valor calorífico de los RSU varía de un país a otro, incluso entre ciudades de la misma nación, influenciados principalmente por aspectos socioeconómicos. En el presente



estudio, se tomó como caso referente el flujo de residuos sólidos urbanos que ingresan al vertedero el Carrasco, ubicado en la ciudad de Bucaramanga (Colombia). La composición física de los RSU se determinó al promediar tres estudios realizados en el vertedero, como se muestra en la figura 2 [27][28].

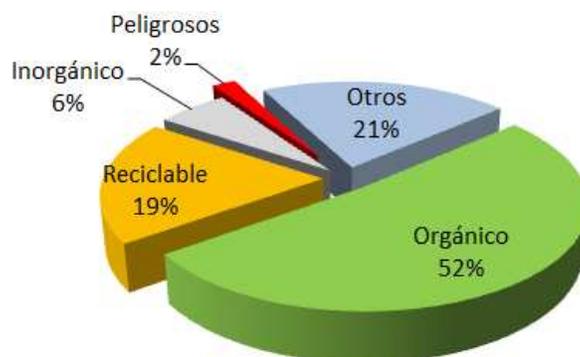


Figura 2. Composición física de RSU. Fuente adaptada[27][28]

El diseño de planta considerado, se muestra en la Figura 3. La planta funciona de la siguiente manera. El fluido de trabajo sale de la bomba 2 (líquido comprimido) pasando por el economizador (vapor saturado) y sobrecalentador (vapor sobrecalentado) de la caldera. El vapor sobrecalentado ingresa a la turbina (corriente 5), donde se expande a presión de condensación (corriente 7). Se realiza una extracción en la turbina proporcionando el vapor necesario para el funcionamiento del desaireador (corriente 6). El vapor condensado ingresa a la bomba 1 (flujo 1) que aumenta la presión del agua a la presión de operación del desaireador (flujo 2). Finalmente, el agua ingresa a la bomba 2, a través de la corriente 3, cerrando el ciclo.

Cálculos energéticos

Definidos los parámetros iniciales de planta (Cuadro 1), se calculan las principales propiedades termodinámicas en cada corriente de flujo de vapor (Cuadro 2), Para ello se utilizó CoolProp [29].

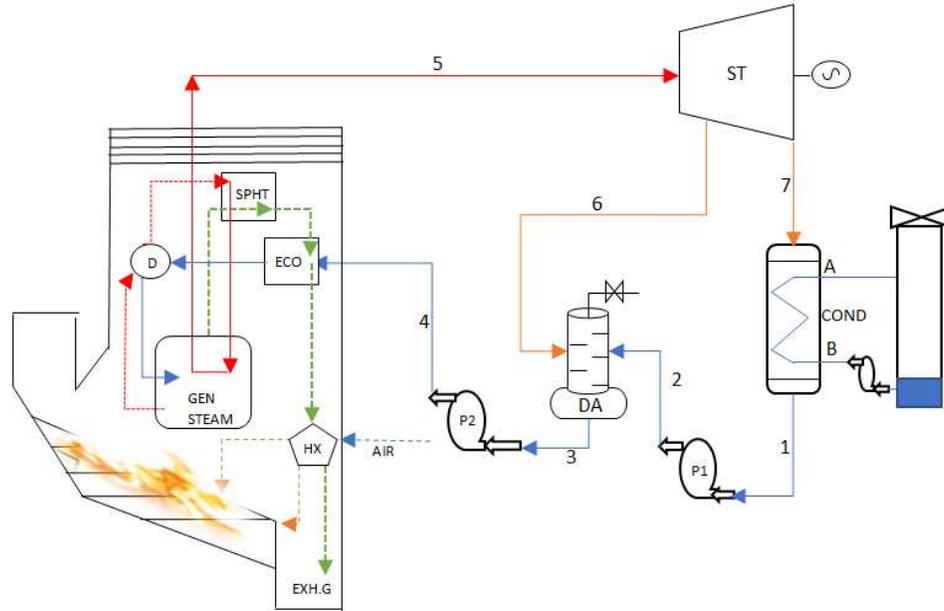


Figura 3. Esquema de planta

Mediante una revisión energética del ciclo, se determina el flujo másico de vapor producido por la caldera y el flujo de residuos (capacidad de planta) que ingresan al horno utilizando la ecuación (1).

$$\dot{m}_{S,OUT,BOIL} = \frac{\dot{m}_{RSU} \cdot \eta_{BOIL} \cdot PCI_{RSU}}{(h_{OUT,BOIL} - h_{IN,BOIL})} \quad (1)$$

La potencia eléctrica y mecánica de la turbina de vapor se calculan con las ecuaciones (2) y (3), si se resta la energía eléctrica consumida en planta EECP a la potencia eléctrica se obtiene la potencia eléctrica líquida generada por el ciclo.

$$\dot{W}_{ST,el} = \dot{W}_{ST,mec} \cdot \eta_{Gen} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{ST,mec} = w_{ST,termico} \cdot \dot{m}_{IN,ST} \quad (3)$$

La eficiencia térmica y líquida del ciclo, se calculan mediante la ecuación (4) y (5)

$$\eta_{Térmica} = \dot{W}_{ST,el} / PCI_{RSU} \cdot \dot{m}_{RSU} \quad (4)$$

$$\eta_{Térmica\ liq} = \dot{W}_{ST,el,liq} / PCI_{RSU} \cdot \dot{m}_{RSU} \quad (5)$$

La energía eléctrica entregada red, el consumo específico de RSU y el índice de electricidad líquida excedente se calculan con las ecuaciones (6),(7) y (8) respectivamente,



$$\dot{W}_{\text{Electrica Red}} = \dot{W}_{\text{ST,el,liq}} \cdot \text{HrsOperacion al año} \quad (6)$$

$$\text{CER} = \dot{m}_{\text{RSU}} / \dot{W}_{\text{ST,el}} \quad (7)$$

$$\text{IELE} = \dot{W}_{\text{ST,el,liq}} / \dot{m}_{\text{RSU}} \quad (8)$$

Cálculos exergéticos

Un análisis de exergía convencional persigue una serie de objetivos, tales como, calcular la eficiencia exergética del sistema, cuantificar la destrucción total de exergía e identificar los equipos o zonas del proceso que causan las mayores irreversibilidades. Estas últimas, se dividen en dos tipos: i) las irreversibilidades internas como pérdidas por fricción y transferencias de calor en el volumen de control; y ii) las irreversibilidades externas como transferencias de calor del sistema al entorno.

Cálculo de exergía en los flujos de vapor

La exergía de flujo de una sustancia se representa en tres componentes, el térmico, el mecánico y el químico. En definitiva, la exergía de una sustancia, se considera como la capacidad de producir trabajo por el hecho de estar en desequilibrio térmico, mecánico y químico con el ambiente.

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + \sum X_j(\mu_j - \mu_{j,0}) \quad (9)$$

El término μ_j es el potencial químico por mol de la especie j a presión y temperaturas de evaluación, mientras que $\mu_{j,0}$ representa el potencial químico de la especie j en situación de equilibrio con el medio ambiente. Considerando que el vapor de agua no interactúa en procesos químicos dentro del ciclo de vapor, se descarta el potencial de exergía química y componentes cinéticos y potenciales.

$$e_i = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (10)$$

Cálculo de Exergía química de RSU.

Para el análisis es necesario conocer la exergía de los combustibles que proveen al proceso, en este caso los RSU. Se calculó para los componentes sólidos C, H, O, N, usando las

ecuaciones 11 y 12 [30]. Donde, $bcha$ es la exergía química de la ceniza que generalmente se discrimina, $bchw$ es la exergía química estándar del agua; zs , za y zw son la fracción másica de azufre, ceniza y agua respectivamente. Finalmente, se calculó la expresión: $(bchs - Cs)$ siendo $bchs$ la exergía química estándar de azufre con las literaturas [31], [30].

$$e_{ch-RSU} = (LHV_{MSW} \cdot \beta) + (bchs - Cs) \cdot zs + bcha \cdot za + bchw \cdot zw \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1.044 + 0.016 \left(\frac{H}{C}\right) - 0.3493 \left(\frac{O}{C}\right) \left[1 + 0.0531 \left(\frac{H}{C}\right)\right] + 0.0493 \left(\frac{N}{C}\right)}{1 - 0.4124 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (12)$$

Donde, H es la fracción másica de hidrógeno presente en el combustible, C es carbono, N es la fracción de nitrógeno y O es oxígeno.

Cálculo de la exergía destruida de cada componente

La siguiente expresión permite calcular la exergía destruida en el volumen de control en régimen permanente:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \sum_s \dot{m}_s e_{fs} - \dot{E}_d \quad (13)$$

Donde \dot{Q}_j es el flujo de exergía asociada a la transferencia de calor, \dot{W}_{vc} está asociada a la exergía de trabajo en eje del volumen de control, las expresiones $e_{f,in}$ y $e_{f,out}$ hacen referencia a la exergía asociada al flujo másico en la entrada y salida del volumen de control respectivamente. La expresión \dot{E}_d representa las irreversibilidades internas, es decir la tasa de destrucción de exergía dentro del volumen de control que es calculada para cada dispositivo con la diferencia de insumo y producto de acuerdo a la ecuación 14, obteniendo como resultado la sumatoria de destrucciones de exergía de cada componente.

$$\dot{E}_{d_k} = \dot{E}_{I,k} - \dot{E}_{P,k} \quad (14)$$

$$\dot{E}_{d_{Total}} = \sum \dot{E}_{d_k} \quad (15)$$



El condensador por ser un componente disipativo, el cálculo de producto no puede expresarse en términos de exergía, por lo tanto, se realiza un balance de exergía en el condensador para cuantificar la exergía destruida en el ciclo.

Calculo del flujo de exergía del ciclo.

El máximo potencial energético de un sistema, es decir el flujo de exergía de un sistema, está dado por la suma de flujo de exergía de los productos (potencial energético de primera ley) más el flujo de exergía destruida más el flujo de exergía perdida.

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \dot{E}_{d,tot} + \dot{E}_{l,tot} \quad (16)$$

La exergía perdida, $\dot{E}_{l,tot}$ no debe confundirse con la exergía destruida. La exergía perdida consiste en la exergía que fluye hacia el entorno, mientras que la destrucción de exergía indica pérdida de exergía dentro de los límites del proceso debido a irreversibilidades.

Calculo de Eficiencia exergética.

La eficiencia exergética permite visualizar cuánto porcentaje del potencial máximo energético del sistema o ciclo se ha alcanzado.

$$\eta_{Exergética} = \dot{W}_{ST,el} / e_{ch-RSU} \cdot \dot{m}_{RSU} \quad (17)$$

Cálculos económicos

Con el objetivo de determinar la viabilidad económica de la planta, se utilizó la metodología de la figura 4. Inicialmente se calcularon los costos de inversión de planta en función de la capacidad de RSU tratados [32], se determinaron los costos de operación y mantenimiento variable y fijo de planta. Con los anteriores resultados se calcula el costo nivelado de electricidad LCOE con la ecuación (9), indicando cuánto cuesta producir un kWh de energía eléctrica.

$$LCOE = \frac{CIA + O\&M_A}{\dot{W}_{ST,el} \cdot Hrs_{Operacion \text{ al año}}} \quad (18)$$

Donde CIA es el costo de inversión anualizado y se define como; el producto del factor de recuperación de capital FRC por la inversión de planta.

$$FRC = \frac{i \cdot (1 + i)^t}{(1 + i)^t - 1} \quad (19)$$

Siendo t la vida útil de la planta en años e (i) es la tasa de interés.

Teniendo el conocimiento de los costos de producción e inversión, se procede a elaborar un flujo de caja, el cual tiene como objetivo calcular el valor presente neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) para determinar cierres financieros y viabilidad económica de la planta.

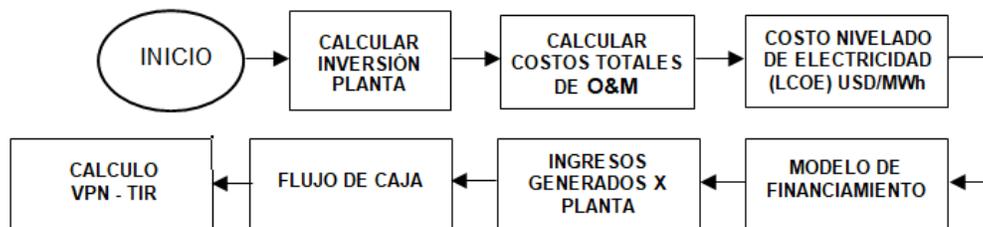


Figura 4. Metodología análisis económico

Resultados

El presente estudio tomó como caso referente las condiciones energéticas y físicas de los flujos de residuos sólidos urbanos que ingresan al vertedero el Carrasco, ubicado en la ciudad de Bucaramanga (Colombia). La potencia eléctrica de planta ($\dot{W}_{ST,el}$) se fijó en 15 MW. Los parámetros iniciales de planta considerados, se observan en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros Iniciales de planta

Parámetro		Valor		Ref
Temperatura ambiente	(T_0)	25	°C	[33]
Presión ambiente	(P_0)	101.325	kPa	[33]
Temperatura del horno	(T_{Horno})	1150	°C	[34]



Poder calorífico inferior	(PCI_{RSU})	8,786	kJ/kg	[27]
Temperatura vapor	(T_{ST})	380	°C	[35]
Presión de vapor	(P_{ST})	4,000	kPa	[35]
Eficiencia Caldera	(η_{BOIL})	0.75	%	[9]
Eficiencia Generador	(η_{Gen})	0.96	%	[36]
Eficiencias isentrópica Bombas	$(\eta_{Isent-BOM})$	0.85	%	[37]
Eficiencia isentrópica Turbina	$(\eta_{Isent-ST})$	0.85	%	[38]
Presión condensador	(P_{COND})	15	kPa	[39]
Presión Desaireador	(P_{DA})	350	kPa	[40]
Potencia eléctrica de turbina Vapor	$(\dot{W}_{ST,el})$	15	MW	[30]
Horas de operación		8,000	Hrs/año	[41]
Total de RSU disponible		1,000	t _{RSU} /día	[27]
Energía eléctrica consumida en planta	(EECP)	150	kWh/t _{RSU}	[30]

Evaluación energética

A partir de los conceptos en primera ley de termodinámica, se calcularon las propiedades en los flujos de corriente ver Cuadro 2. Los principales resultados, derivados de los diferentes balances de masa y energía se observan en la Cuadro 3. La planta considerada, entrega a la red energía eléctrica alrededor de 87.433 GWh por año, con una eficiencia térmica del 22.6%, capaz de generar por carga de 1.81 kg de RSU, 1 kWh de energía eléctrica y 402.7 kWh por tonelada de residuo.

Cuadro 2. Propiedades termodinámicas

Corriente	Flujo \dot{m} (kg/seg)	Presión p (kPa)	Temperatura t (°C)	Entalpía h (kJ/kg)	Entropía s (kJ/kg.K)	Exergía E (kW)
1	16.497	15	53.969	225.944	0.755	89.772
2	16.497	350	53.997	226.344	0.755	94.654

3	19.270	350	138.857	584.261	1.727	1422.263
4	19.270	4,000	139.384	588.893	1.733	1480.137
5	19.270	4,000	380.000	3166.766	6.699	22621.412
6	2.774	350	138.857	2712.874	6.894	1836.388
7	16.497	15	53.969	2319.956	7.156	3148.941
A	826.414	101.325	298.150	104.920	0.367	0.000
B	826.414	101.325	308.150	146.720	0.505	566.623

Cuadro 3. Rendimientos energéticos de planta

Parámetro	Valor	
	Producción de vapor en caldera (\dot{m}_{S-CALD})	5.352
Capacidad de planta (\dot{m}_{RSU})	651.346	t_{RSU}/dia
Eficiencia térmica ($\eta_{Térmica}$)	22.6	%
Potencia eléctrica líquida ($\dot{W}_{ST,el,liq}$)	10.929	MW
Eficiencia líquida ($\eta_{Térmica liq}$)	16.5	%
Electricidad entregada a red ($\dot{W}_{Electrica Red}$)	87.433	GWh/año
Consumo específico de RSU (CER)	1.81	kg/kWh
Índice de electricidad líquida excedente (IELE)	402.701	kWh/ t_{RSU}

Evaluación Exergética

Los flujos de exergía en cada corriente del ciclo de vapor se pueden observar en el Cuadro 2. La exergía química de los RSU se observa en el Cuadro 4. El valor y porcentaje de exergía destruida por cada dispositivo se describe en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Cálculo de la Exergía química RSU

Exergía química de los RSU	
β	1.111



PCI-RSU	(kJ/Kg)	8,786
Exergía química RSU E_{ch}		
e_{ch}	(kJ/Kg)	9,765.928
Flujo másico de RSU	(kg/s)	7.538
E_{ch}	(kW)	73,622.740

Los resultados muestran que la mayor destrucción de exergía se produce en la caldera, cerca del 90.6% de la destrucción total de exergía. El problema de este dispositivo radica en los parámetros de vapor (4. 0 MPa / 380°C), que se ven penalizados por problemas de corrosión [42]. Poco se puede hacer para reducir las irreversibilidades que se producen en este dispositivo; sin embargo, los avances tecnológicos en cuanto a materiales con mayor resistencia a la corrosión (Inconel) entre otros [48] permitirían reducir la exergía destruida en la caldera. A pesar de que otros componentes no tienen destrucción de exergía significativa, estos deben analizarse para cuantificar un valor de destrucción de exergía exógena asociados con ellos, que pueden contribuir a mejorar el rendimiento de la planta; pero esto solo se puede lograr a través del análisis de exergía avanzado [30].

Cuadro 5. Definición insumo-producto y destrucción de exergía por dispositivo

Dispositivo	Insumo [kW]	Producto [kW]	Ed [kW]	%Ed
Bomba1	$\dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1)$	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	1,711	0,003%
Da	$\dot{m}_6 \cdot (e_6 - e_3)$	$\dot{m}_2 \cdot (e_3 - e_2)$	508,778	0,878%
Bomba2	$\dot{m}_3 \cdot (h_4 - h_3)$	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$	31,377	0,054%
Caldera	$\dot{m}_{RSU} \cdot e_{ch-RSU}$	$\dot{E}_5 - \dot{E}_4$	52,481.46	90,605%
Turbina vapor	$\dot{E}_5 - \dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_6 h_6$	2,407.65	4,157%
Condensador		$\dot{E}_7 + \dot{E}_A - \dot{E}_1 - \dot{E}_B$	2,492.54	4,303%
Exergía total destruida			57,923.53	100%

La eficiencia exergética se calculó en 20.3% lo cual se traduce en 58.6 MW de potencial energético que no se está aprovechando. Si bien, no es posible utilizar todo el potencial energético de un sistema térmico debido a las irreversibilidades, este tipo de estudio permite identificar los dispositivos con mayor exergía destruida, que por medio de un análisis avanzado de exergía, se podrían calcular factores exergéticos evitables e inevitables.

Cuadro 6. Resultados basados en segunda ley (Escenario Base C0)

Parámetro		Valor	Unidad
Eficiencia Exergética	$\eta_{\text{Exergética}}$	20.37	%
Entrada de Exergía	$\dot{E}_{F,\text{tot}}$	73.6	MW
Exergía productos	$\dot{E}_{P,\text{tot}}$	15	MW
Exergía destruida	$\dot{E}_{d,\text{Total}}$	57.9	MW
Exergía perdida	$\dot{E}_{l,\text{tot}}$	0.7	MW

Evaluación Económica.

Para la definición de la inversión, costos de producción y mantenimiento de planta se utilizó como referencia el trabajo de Schneider (2010) [32]. Los valores de los conceptos mencionados se estimaron en función de los RSU procesados en planta por año (capacidad planta). Los costos de inversión en bienes de capital se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Costos de inversión en bienes de capital

Tipo de inversión	Estimación (USD/ $t_{\text{RSU-año}}$)	% Inversión capital	Costo (USD)
Infraestructura y almacenamiento de RSU	51.05	7.5 %	11,084,472
Sistemas combustión y generadores de vapor	216.42	32 %	46,988,523



Sistemas de agua y vapor	88.78	13 %	19,277,343
Sistemas de limpieza de gases	85.45	13-15 %	18,554,443
Diseños de planta	22.2	3 %	4,819,336
Costo de construcción	79	11.5 %	16,867,675
Instalación electromecánica	55.5	8-9 %	12,048,339
Otros costos	65.5	10 %	14,458,007
Total			144,098,138

De acuerdo con la referencia [43], los costos de operación y mantenimiento de una planta de generación eléctrica por medio de RSU son estimados en 392.82 \$ / kW-año, para los fijos y los variables en 8,75 \$ / MWh. Se calculó el LCOE con una tasa de interés de 10% y una vida útil de planta de 25 años, se calculó en 190.14 dólares por MWh. Con relación a los costos de producción de energía eléctrica en plantas WtE de RSU, el Departamento De Energía De Los Estados Unidos y la Oficina De Eficiencia Energética Y Energía Renovable en su reporte de agosto de 2019 publicó los valores de LCOE para las plantas WtE en los Estados Unidos, estando entre 120 y 170 US\$/MWh, los cuales se aproximan a los valores de este estudio [44].

Cuadro 8. Variables para el cálculo del LCOE

Costo de inversión (USD)	FRC	O&M (Fijos) (USD)	O&M (Variables) (USD)	Horas (Años)	Potencia Planta (kW)	LCOE (US\$/MWh)
144,098,138	0.11	5,892,300	1,050,000	8,000	15,000	190.144

El modelo de financiamiento representa una carga financiera debido a reglas fiscales de cada nación e intereses de préstamo. Para este estudio se definieron las condiciones del préstamo, tipo de financiamiento (largo plazo) y amortizaciones (PRICE).

Cuadro 9. Condiciones del préstamo

Concepto Financiero	Valor	Ref.
Impuesto sobre la renta	33%	[45]
Horizonte de Planeamiento	25 Años	[9]
Cuota financiada de la inversión	60%	
Plazo de financiamiento	15 Años	
Tasa de interés de préstamo	10%	
Tasa mínima aceptable TMA	10%	[46]

Para elaborar el flujo de caja, se tuvieron en cuenta los ingresos relacionados con precios por venta de energía, venta de metales y tarifa de eliminación de RSU. Se describen en el siguiente Cuadro.

Cuadro 10. Ingreso anual generado por planta

Concepto Ingreso	Estimación	Ref.	Ingreso (USD \$/año)
Venta Energía eléctrica	115.1 US\$ / MWh	[47]	10,063,500
Eliminación de RSU	42.1 US\$ / t RSU	[48]	15,348,250
Venta de metales separados	665,610 US\$ / año	[32]	665,610
Total			26,077,360

Se calculó la depreciación anual de los equipos y activos [49], calculando la depreciación anual en 4,905,101 USD y redefiniendo los costos distribuidos en planta, siendo del 60% para el equipamiento [50]. Realizados los cálculos de flujos de caja, se puede observar las relaciones VAN, TIR del caso de estudio, logrando para el año 19 y 7 meses el retorno de la inversión RI.

Cuadro 11. Resultados VAN, TIR y RI

Indicadores económicos de planta	RI	(Años)	VAN (USD)	TIR	(%)
		19.7		5,880,477	10.99%



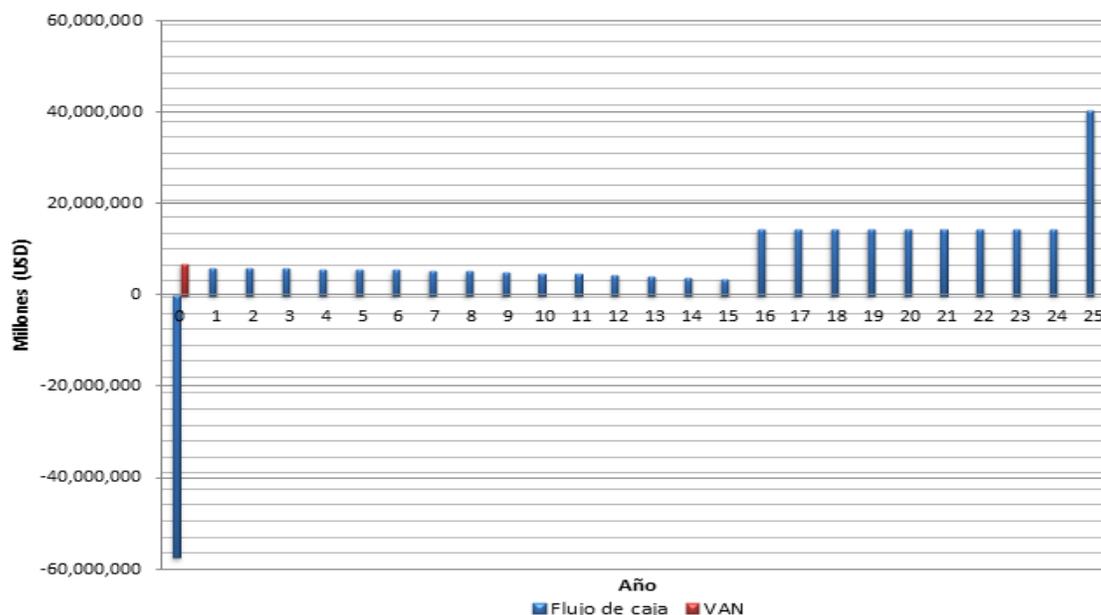


Figura 5. Flujo de caja de planta

Conclusiones

Las plantas WtE se han convertido en soluciones convenientes para la gestión sostenible de los RSU. Los procesos de combustión con recuperación energética (electricidad / calefacción urbana y en algunos casos, refrigeración urbana) representan las tecnologías alternativas que dominan el mercado de desechos, alcanzando una madurez tecnológica probada en más de 2000 plantas WTE instaladas alrededor del mundo.

Del análisis energético realizado se determinó que la planta, procesando 652 toneladas de RSU al día con una eficiencia térmica de 22.6%, lograría entregar 87 GWh al año, un estimado de cobertura eléctrica mensual de 46,000 hogares en Colombia. No obstante, la cantidad de energía recuperada varía significativamente con las características de los RSU, (principalmente el contenido de humedad que afecta al PCI), la tecnología junto a diferentes configuraciones y los parámetros del ciclo de vapor, estos últimos, penalizados por efectos corrosivos en la zona convectiva de la caldera.

En cuanto al análisis exergético, se logró cuantificar que en la caldera se destruye el 90% de la exergía, lo cual invita a ingenieros a analizar las variables que conllevan esta pérdida de potencial energético y proponer alternativas que disminuyan las irreversibilidades en los procesos de la caldera.

Evaluando los resultados del análisis económico, se evidencian dos aspectos relevantes de los cuales depende la rentabilidad de una planta WtE, siendo del orden técnico y financiero, tales como la capacidad de planta. Es decir, cuántos RSU procesa en el año, el PCI de los RSU susceptible a incrementar, si se realizan tratamientos biológicos mecánicos MTB en planta. Factores económicos como las condiciones de préstamo (potenciar las alianzas público-privadas), ingresos por venta de electricidad y un factor predominante en este análisis, la tarifa de eliminación de RSU, para este estudio se tasó en 42 dólares por tonelada, en Europa se manejan valores de alrededor de 120 dólares por tonelada de RSU procesada.

Las plantas incineradoras de RSU enfrentan una gran resistencia social e incertidumbre fundadas en los gases de escape producto de la combustión, ya que estos están compuestos por dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorados que representan altos riesgos para la salud humana. No obstante, el desarrollo tecnológico de última generación en cuanto a limpieza de humos permitiría operar una planta moderna WtE cumpliendo las estrictas normas y valores límites de emisiones establecidas.

Referencias

- [1] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, "What a waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," Washington, DC: World Bank, 2018.
- [2] D. Wang, Y. Tang, G. Long, D. Higgitt, J. He, and D. Robinson, "Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England," *Waste Manag.*, vol. 102, pp. 452–463, 2020.
- [3] A. Glikson, "International Carbon Conference 2018, ICC 2018, 10–14 September 2018, Reykjavik, Iceland: The methane time bomb," *Energy Procedia*, vol. 146, pp. 23–29, 2018.



- [4] A. T. Nair, J. Senthilnathan, and S. M. S. Nagendra, "Emerging perspectives on VOC emission from landfill sites: Impact on tropospheric chemistry and local air quality," *Process Saf. Environ. Prot.*, 2018.
- [5] C. Wu, J. Liu, S. Liu, W. Li, L. Yan, and M. Shu, "Chemosphere Assessment of the health risks and odor concentration of volatile compounds from a municipal solid waste landfill in China," *Chemosphere*, vol. 202, pp. 1–8, 2018.
- [6] C. Li, L. Yang, J. Wu, Y. Yang, Y. Li, Q. Zhang, Y. Sun, D. Li, M. Shi, and G. Liu, "Identification of emerging organic pollutants from solid waste incinerations by FT-ICR-MS and GC/Q-TOF-MS and their potential toxicities," *J. Hazard. Mater.*, vol. 428, p. 128220, 2022.
- [7] J. Cerda, R. Alves, and J. Perrella, "Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities," *Energy*, vol. 55, pp. 728–741, 2013.
- [8] L. J. de Vilas Boas da Silva, I. F. S. dos Santos, J. H. R. Mensah, A. T. T. Gonçalves, and R. M. Barros, "Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential," *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 1386–1394, 2020.
- [9] E. N. Kalogirou, *Waste-to-Energy Technologies and Global Applications*, 1ª Edición. Boca Ratón: Taylor & Francis Group, 2017.
- [10] L. Cutz, P. Haro, D. Santana, and F. Johnsson, "Assessment of biomass energy sources and technologies : The case of Central America," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1411–1431, 2016.
- [11] H. D. Beyene, A. A. Werkneh, and T. G. Ambaye, "Current updates on waste to energy (WtE) technologies : a review," *Reinf. Plast.*, vol. 24, no. 00, pp. 1–11, 2018.
- [12] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, and C. S. Ho, "Energy , economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in," *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 111–120, 2015.
- [13] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, and K. Techato, "The evolution of waste-to-energy incineration : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. November 2017, pp. 812–821, 2018.
- [14] P. Mondal, S. Samanta, S. Arafat Zaman, and S. Ghosh, "Municipal solid waste fired combined cycle plant: Techno-economic performance optimization using response surface methodology," *Energy Convers. Manag.*, vol. 237, p. 114133, 2021.
- [15] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, "A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste," *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 26–44, 2015.
- [16] S. T. Coelho and R. Diaz-chavez, *Best Available Technologies (BAT) for WtE in Developing Countries*. Elsevier Inc., 2020.
- [17] A. Ohji and M. Haraguchi, *2. Steam turbine cycles and cycle design optimization: the Rankine cycle, thermal power cycles, and IGCC power plants*. Elsevier Ltd, 2017.
- [18] I. Dincer and M. E. Demir, *4 . 8 Steam and Organic Rankine Cycles*, vol. 4. 2018.
- [19] F. A. M. Lino and K. A. R. Ismail, "Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 752–757, 2017.

-
- [20] F. C. Dalmo, N. M. Simão, H. Q. De Lima, A. Carolina, M. Jimenez, S. Nebra, G. Martins, R. Palacios-bereche, P. Henrique, and D. M. Sant, “Energy recovery Overview of Municipal Solid Waste in São Paulo State, Brazil,” *J. Clean. Prod.*, 2019.
- [21] P. Pan, W. Peng, J. Li, H. Chen, G. Xu, and T. Liu, “Design and evaluation of a conceptual waste-to-energy approach integrating plasma waste gasification with coal-fired power generation,” *Energy*, vol. 238, p. 121947, 2022.
- [22] M. Pan, F. Lu, Y. Zhu, H. Li, J. Yin, Y. Liao, C. Tong, and F. Zhang, “4E analysis and multiple objective optimizations of a cascade waste heat recovery system for waste-to-energy plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 230, p. 113765, 2021.
- [23] M. L. N. M. Carneiro and M. S. P. Gomes, “Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, pp. 397–417, 2019.
- [24] L. Francisco, V. Francisco, L. Batistella, C. Albrecht, J. Constantino, M. Moreira, H. Jorge, and R. De F, “Evaluation of gaseous emissions from thermal conversion of a mixture of solid municipal waste and wood chips in a pilot-scale heat generator,” vol. 141, pp. 402–410, 2019.
- [25] M. Montagnana, V. Leme, M. Henrique, E. Eduardo, S. Lora, O. José, and B. Marciano, “Resources , Conservation and Recycling Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil,” *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 87, pp. 8–20, 2014.
- [26] E. T. de F. Ferreira and J. A. P. Balestieri, “Comparative analysis of waste-to-energy alternatives for a low-capacity power plant in Brazil,” *Waste Manag. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 247–258, Jan. 2018.
- [27] E. D. A. D. B. S. A. – E. EMAB, “Invitación Pública Para La Selección De La Nueva Tecnología, Su Implementación Y Operación, Para El Tratamiento Alternativo De La Disposición Final Y El Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Urbanos (Rsu) En La Ciudad De Bucaramanga, Departamento De San,” P. 202, 2017.
- [28] M. Szanto and J. Rodriguez, “Consortio Bio- Inge 2015 Contrato De Consultoría Especializada No 193 De 2015 Formulacion De La Regionalización De La Prestación De Servicio Público De Aseo En Recolección , Transporte , Transferencia , Aprovechamiento Y Disposición Final En El Marco De La,” Bucaramanga, 2015.
- [29] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, “Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,” 2014.
- [30] A. Bhering, J. Carlos, E. Palacio, A. Martínez, D. J. Rúa, E. E. Silva, M. Luiza, G. Renó, and O. Almazán, “Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 157, no. November 2017, pp. 195–214, 2018.
- [31] “Szargut J, Morris DR, Steward FR. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere 1988.” p. 1988, 1988.
- [32] D. R. Schneider, “Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant,” vol. 52, no. 3, pp. 369–378,
-



2010.

- [33] J. LAZAR, R., & EDER, “Estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, UIS. 2001.” 2001.
- [34] C. Europea, *mejores técnicas disponibles de referencia europea para incineración de residuos*. 2011.
- [35] L. Branchini, “Advanced Waste-To-Energy Cycles,” Alma Mater Studiorum – Università di Bologna Research, 2012.
- [36] O. Gohlke and J. Martin, “Drivers for innovation in waste-to-energy technology,” *Waste Manag. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 214–219, 2007.
- [37] M. Moran and H. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7th. ed.* New Jersey, 2011.
- [38] K. Nag, P. R. Deshmukh, and D. D. Programme, *Engineering Thermodynamics*. Tata McGraw - Hill Education Pvt. Ltd., New Delhi, 2008.
- [39] G. Barigozzi, A. Perdichizzi, and S. Ravelli, “Wet and dry cooling systems optimization applied to a modern waste-to-energy cogeneration heat and power plant,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1366–1376, 2011.
- [40] O. Badr, S. D. Probert, and P. O. Callaghan, “Rankine Cycles for Steam Power-plants f (),” vol. 36, pp. 191–231, 1990.
- [41] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, “A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste,” *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 26–44, 2015.
- [42] P. Viklund, A. Hjörnhede, P. Henderson, A. Stålenheim, and R. Pettersson, “Corrosion of superheater materials in a waste-to-energy plant,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 105, pp. 106–112, 2013.
- [43] “Independent Statistics and Analysis EIA. Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Washington: 2013.”
- [44] D. U.S. Department of Energy, “Waste-to-Energy from Municipal Solid Wastes,” 2019.
- [45] Congreso de Colombia, *LEY 1819 DE 2016, Impuesto sobre la Renta de Personas Naturales*. Colombia, 2016.
- [46] Fundacion Carlos slim, “Formulación y evaluación de proyectos, Cálculo de la TMAR, Disponible en <https://cdn3.capacitateparaelemplo.org/assets/4eqz4uo.pdf>,” 2018.
- [47] E. XM, “Precio promedio y energía transada, Disponible en <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/precio-promedio-y-energia-transada.aspx>.”
- [48] E. D. A. D. B. S. A. – E. EMAB, “Respuesta cuestionario proposicion no. 3, en funcion del debate de control politico concejo municipal de bucamamanga,” Bucaramanga, 2019.
- [49] E. De Oliveira and J. A. Barra, “Análisis y simulación económica en central de cogeneración a partir de biomasa de la industria de aceite de palma, MBA UNIFEI,” Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [50] N. Castillo, “Evaluación termodinámica y económica para la generación eléctrica por medio de la incineración de residuos sólidos urbanos,” UDES, 2019.

Los potenciales bioenergéticos en Brasil

Bioenergetic potentials in Brazil

Laura Vieira Maia de Sousa

Universidad Federal de Itajubá. Brasil

lauravmaia@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6379-4803>

Electo Eduardo Silva Lora

Universidad Federal de Itajubá. Brasil

silva.electo52@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8969-3541>

Fábio Cordeiro de Lisboa

Universidad de Brasília. Brasil

fabiodelisboa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4229-978X>

Fernando Bruno Dovichi Filho

Universidad Federal de Itajubá. Brasil

brunodovichi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1862-7202>



Resumen

Brasil, dada su extensión territorial y posición destacada en la producción de commodities, tiene un gran potencial bioenergético por recuperar. El hecho es que el país es uno de los principales productores agrícolas del mundo, ocupando la cuarta posición en el ranking mundial de superficie cultivada agrícola y la tercera en cuanto a tamaño de rebaños. Por tanto, el presente trabajo busca evaluar el potencial bioenergético de la biomasa residual agrícola y forestal, de las excretas de ganado vacuno, porcino y de aves, de los residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales, de la industria del papel y la celulosa y del carbón vegetal. Desde un enfoque centrado en los recursos, se calculó el potencial teórico y técnico de las biomásas identificadas. Además, se elaboraron mapas de potencial energético utilizando la herramienta de geoprocésamiento QGIS 3.24.2 Tisler. Los resultados indican que los mayores potenciales fueron de biomasa agrícola, con 8.245,62 PJ/año para teórica y 52,3 GW para técnica, alcantarillado con 1.925,97 PJ/año y 15,3 GW para técnica y excretas, con 1.433,31 PJ/año y 12,7 GW.

Palabras clave

Biomasa; Bioenergía; Geoprocésamiento; Energía potencial; Potencial teórico; Potencial técnico.

Abstract

Brazil, given its territorial extension and prominent position in the production of commodities, has great bioenergy potential to be recovered. The fact is that the country is one of the main agricultural producers in the world, being in fourth position in the global ranking of agricultural cultivated area and third in terms of herd size. Therefore, the present work seeks to evaluate the bioenergetic potential of agricultural and forestry residual biomass, of excreta of cattle, pigs and chickens, of urban solid waste (MSW) and sewage, of the paper and cellulose industry and charcoal. From an approach focused on resources, the theoretical and technical potential of the identified biomasses were calculated.

Furthermore, energy potential maps were prepared using the geoprocessing tool QGIS 3.24.2 Tisler. The results indicate that the greatest potentials were from agricultural biomass, with 8,245.62 PJ/year for theoretical and 52.3 GW for technical, sewage with 1,925.97 PJ/year and 15.3 GW for technical and excreta, with 1,433.31 PJ/year and 12, 7 GW.

Keywords

Biomass; Bioenergy; Geoprocessing; Energy potential; Theoretical potential; Technical potential.

Introducción

Brasil es uno de los mayores productores agrícolas del mundo. Según MAPA (2022), el valor total de las exportaciones en 2021 de soja, carne, maíz, algodón y productos forestales tuvo un incremento de 19,7% respecto al año 2020, con un valor de US\$120 bi. También es un hecho que, en relación con los recursos de biomasa, Brasil tiene un gran potencial de recuperación energética. Los excrementos animales, los Residuos Sólidos Municipales (RSM) y las industrias de aguas residuales, pulpa y papel y carbón vegetal pueden convertirse en electricidad a través de tecnologías de recuperación.

Según la Empresa de Investigación de Energía (EPE) de Brasil, se proyecta que la demanda de energía eléctrica se triplique para el año 2050. En 2020, el 33,7% del consumo total de energía en el país se debió a la bioenergía, con un aumento proyectado en la contribución de bioenergía en la matriz en un 8,6%. Es decir, 15,1 GW en los próximos diez años (Nogueira et al., 2021). Autores como Portugal-Pereira et al. (2015), Ferreira et al. (2018), Cervi et al. (2019), Silva et al. (2021), Souza et al. (2021) y Costa et al. (2022) presentan valores de potenciales bioenergéticos prospectivos para biomasa agrícola y forestal, residuos sólidos. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es evaluar el potencial teórico, en PJ/año, y técnico, en MW, de las biomásas residuales agropecuarias y forestales, excretas



de los rebaños porcinos, bovinos y de aves, residuos sólidos urbanos y aguas residuales e industriales de papel y celulosa y carbón vegetal. Además, se prepararon mapas de potencialidad para todas las biomasas.

Materiales y métodos

La metodología utilizada para desarrollar la investigación tuvo en cuenta el enfoque centrado en los recursos (Vis et al, 2010; De Souza et al., 2021) (figura 1). Es decir, se evalúan las potencialidades teóricas y técnicas, considerando también aspectos de la proporción de residuos por radio de cosecha. Las variables utilizadas para determinar el potencial teórico de la biomasa residual agrícola fueron la productividad anual del cultivo, en toneladas, el factor de disponibilidad anual, el poder calorífico inferior, en GJ/t, y la relación residuo por producción. También se consideró la vinaza. El dato considera la zafra de caña de azúcar de 2020, con una producción de 757,1 millones de toneladas. El cálculo también considera la proporción de caña de azúcar destinada a la producción de etanol, la productividad promedio de etanol, la generación promedio de vinaza por cada m³ de etanol producido, así como la respectiva producción de biogás. Finalmente, la fracción de metano (CH₄) en el biogás y su PCI, en MJ/Nm³. Para las excretas de bovinos, porcinos y pollos se tuvo en cuenta el número de animales criados, la cantidad de excretas animales, en ton/año, el porcentaje de sólidos, la cantidad de biogás generado por sólidos volátiles, en Nm³/tVS, la fracción de metano en el biogás producido y poder calorífico del metano.

La metodología para determinar el potencial de los residuos sólidos urbanos siguió la metodología propuesta por De Oliveira Leite et al. (2022). En cuanto a las aguas servidas, se estimó un potencial con base en la base de datos del Sistema Nacional de Información Sanitaria (SNIS). Para el licor negro de la industria de celulosa y papel, se estimó un factor de producción promedio con base en la producción de celulosa y licor negro producida en 2020 en Brasil. Para el licor negro de la industria de celulosa y papel, se estimó un factor de producción promedio con base en la producción de celulosa y licor negro producida en 2020 en Brasil. La industria del carbón vegetal, por su parte, fue evaluada en base a dos

escenarios: energía disponible a partir del carbón vegetal y recuperación de gases de carbonización.

Las tecnologías consideradas para la conversión energética de la biomasa residual y sus respectivas eficiencias se muestran en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Tecnologías y respectivas eficiencias consideradas para la conversión energética de la biomasa residual.

Biomasa	Tecnología de conversión	Eficiencia [%]
Agrícola y forestal	ORC/SRC	20-25
Excretas animales	Motor de gas	28
Residuos Sólidos Urbanos - Incineración	MCI	39,6
Residuos Sólidos Urbanos - Digestión Anaeróbica	MCI	25
Aguas residuales	MCI	25
Industria de la pulpa y el papel	SRC	24,5
Industria del carbón - uso directo del carbón	SRC	24
Industria del carbón - gases de carbonización	SRC	24

Se utilizó la herramienta de geoprosesamiento QGIS 3.24.2 Tisler para generar los mapas de potencialidad con la unión de datos de microrregiones y municipios disponibles en la base de datos IBGE (2022) y el Sistema de Referencia Geocéntrico de las Américas (Figura 1) (SIRGAS 2000).



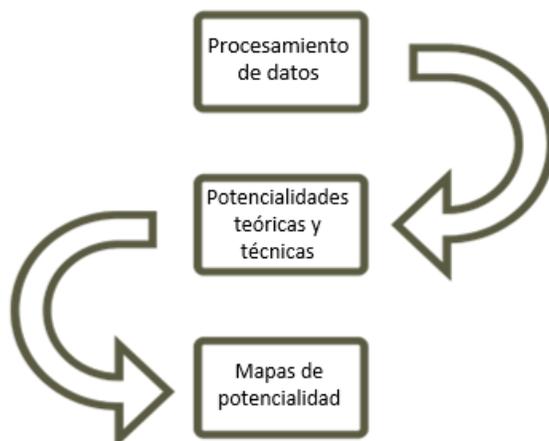


Figura 1. Secuencia metodológica del estudio.

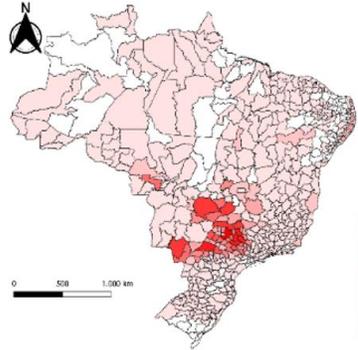
Resultados

Los resultados de los potenciales se presentan en la Cuadro 1. Los resultados del análisis de mapas por microrregión de energía primaria a partir de residuos agrícolas destacan los cultivos de caña de azúcar, maíz y soja.

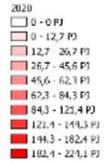
Cuadro 2. Potencialidad teórica y técnica de las biomásas estudiadas.

Biomasa	Teórico [PJ/año]	Técnico [MW]
<i>Agrícola</i>	8.343,80	53.165,14
<i>Forestal</i>	477,91	3.030,89
<i>Carbón vegetal</i>	247,81	2.420,92
<i>Excretas</i>	766,96	6.809,62
<i>RSU</i>	366,21	2.779,87
<i>Aguas residuales</i>	1.920,60	15.225,47
<i>Licor negro</i>	429,19	3,334.33

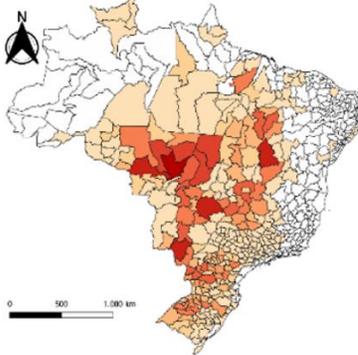
En el potencial técnico, la biomasa agrícola y forestal, seguida de las aguas residuales y excrementos animales, se destacaron frente a las biomásas estudiadas con 52.293,36 MW, 15.268 MW y 12.726,03 MW, respectivamente.



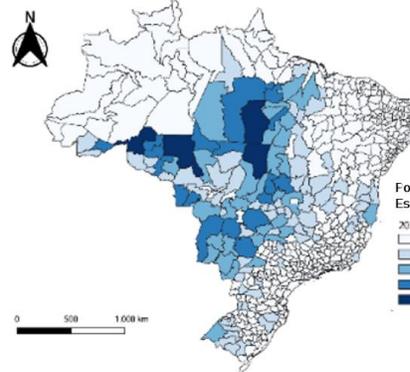
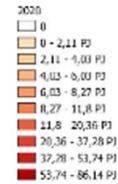
Fotencial de energía primaria
Bagazo de paja y caña de azúcar,
en FJ



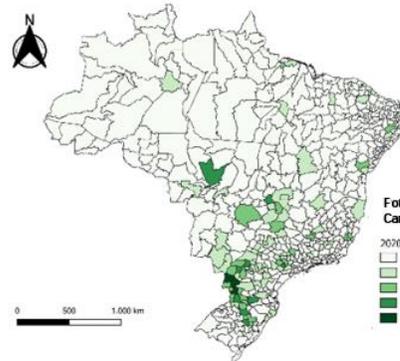
Fotencial de energía primaria
Fastrojo de maíz, en FJ



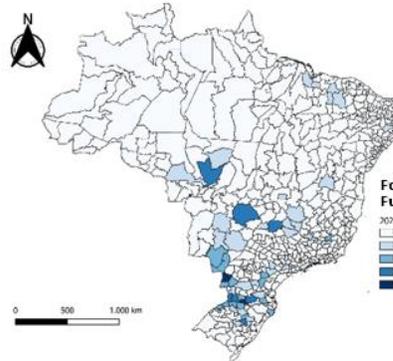
Fotencial de energía primaria
Faja de soja, en FJ



Fotencial de energía primaria
Estiércol de ganado, en FJ



Fotencial de energía primaria
Cama de pollo, en FJ



Fotencial de energía primaria
Furines de cerdo, en FJ



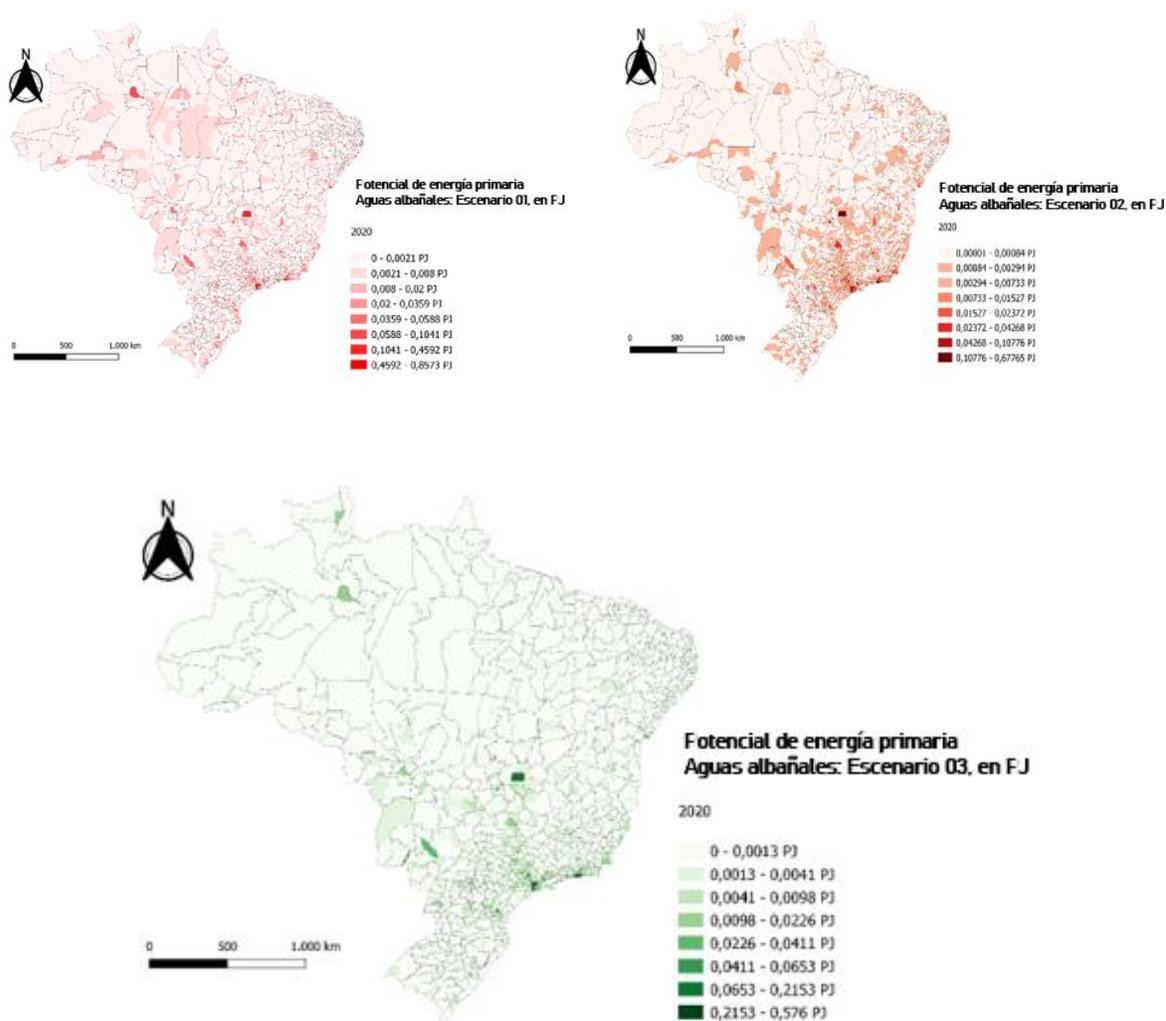


Figura 2. Mapas de potencialidad. Energía primaria, en PJ/año.

La Figura 3 muestra los valores totales de capacidad teórica, técnica e instalada. La capacidad instalada se refiere a la capacidad actual de todas las plantas que usan fuentes de biomasa consideradas en el estudio y la capacidad instalada total se refiere a toda la capacidad de generación instalada en el sistema eléctrico brasileño. En ambos escenarios se consideran las plantas que ya están en operación.

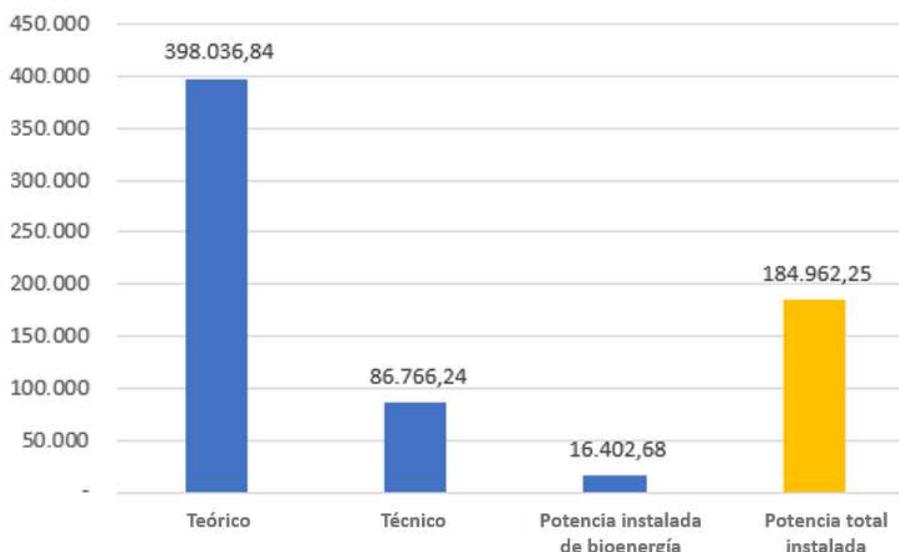


Figura 3. Valores totales de capacidad teórica, técnica e instalada.

Además de los 16.770 MW ya instalados y en operación, que se refieren básicamente a la explotación de caña de azúcar y licor negro, y que representan el 9,1% del total de la potencia brasileña instalada y regulada por ANEEL, es técnicamente posible realizar inversiones para realizar otra 75.000 MW viables para la generación de electricidad a partir de biomasa.

Conclusiones y/o recomendaciones

Con estos resultados, se concluye que Brasil debe habilitar cerca de 185 GW instalados para la reutilización de toda esta biomasa, prospectada en 12.552,49 PJ (Figura 3), sin considerar los 16 GW ya instalados de plantas de caña de azúcar y licor negro de alcohol según ANEEL. Fueron consideradas también las excretas animales, residuos forestales, residuos sólidos urbanos, aguas residuales, la industria de papel y celulosa y el carbón vegetal. Considerando el análisis a nivel nacional y los más de cinco mil municipios, se sugiere profundizar los estudios en relación al potencial técnico-económico para evaluar la factibilidad de



recuperación de los recursos. Por lo tanto, los radios de transporte y económicos pueden ser considerados y, por lo tanto, un enfoque integrado para el análisis.

Agradecimientos

Gracias al Programa de Formación de Recursos Humanos 46.1 de la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, con sede en la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI). Al CNPq y CAPES por las becas de productividad concedidas.

Referencias

- CERVI, W. R. et al. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in brazil: A spatially explicit assessment. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, v. 122, p. 391–399, 2019.
- COSTA, G. G. da et al. Mapping and energy analysis of brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 349, p. 131466, 2022.
- DE OLIVEIRA LEITE, Filipe Ferreira et al. Evaluation of technological alternatives for the treatment of urban solid waste: A case study of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 330, p. 129618, 2022.
- FERREIRA, L. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 94, p. 440–455, 2018.
- MAPA – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento. Las exportaciones de agronegocios alcanzan récord en diciembre y en el año 2021. 2022.
- NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S.; LORA, E. S. Bioenergía no brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. *Revista Brasileira de Energia*, n. 27, p. 2, 2021.
- PORTUGAL-PEREIRA, J. et al. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in brazil. *Biomass and bioenergy*, Elsevier, v. 81, p. 521–533, 2015.
- SILVA, L. A. et al. Rice husk energy production in brazil: An economic and energy extensive analysis. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 290, p. 125188, 2021.
- SOUZA, L. L. P. de et al. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in brazil towards 2050. *Energy Reports*, Elsevier, v. 7, p. 2574–2587, 2021.
- VIS, MW et al. Armonización de las evaluaciones de recursos de biomasa Volumen I: Manual de mejores prácticas y métodos. 2010.

Dendroenergía y volatilidad macroeconómica. Viabilidad de cultivos dendroenergéticos en Argentina

Wood energy and macroeconomic volatility. Viability of wood energy crops in Argentina

Demián Olemberg

Centro de Investigación en Economía y Prospectiva, Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria, Argentina

olemberg.demian@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0001-6129-6763>

Ana María Lupi

Instituto de Suelos, Centro de Investigación de Recursos Naturales, Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria, Argentina

lupi.ana@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-7969-2534>

Resumen



La transición energética es ya tanto un objetivo político ambiental como de diplomacia internacional, además de ser una necesidad técnica y económica de las matrices energéticas nacionales. Esto suele justificar esfuerzos económicos especiales en incentivar estratégicamente la producción de energías renovables, generalmente requiriendo la asignación de recursos por fuera de las determinaciones corrientes del mercado, ya sea mediante subsidios directos u otros mecanismos de transferencia. Para una construcción e implementación adecuadas de políticas públicas en este sentido, se requiere la evaluación económica de los potenciales proyectos productivos, a fin de poder modelar su viabilidad ante diferentes contextos futuros posibles, y así cuantificar el nivel de subsidio que eventualmente requerirían para las respectivas condiciones económicas vigentes. El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación *ex ante*, modelizando para el período de los últimos 11 años (2010-2021) los efectos que generan los cambios en las condiciones económicas de contexto (precios relativos) sobre la viabilidad de plantaciones dendroenergéticas con *Eucalyptus grandis* en la región nordeste de Argentina. El modelo que construimos se basa en el análisis de flujos de fondos, optimización computacional y simulación de escenarios. Los resultados muestran que, para la mayor parte de la serie temporal analizada, y para las condiciones medias de los distintos escenarios de supuestos posibles, el modelo no resulta viable, ya que el precio mínimo que imponen las condiciones de producción y oferta de biomasa es superior al precio máximo que puede llegar a compensar la etapa de transformación energética.

Palabras clave

Evaluación económica, Modelo de simulación, Bioenergía, Biomasa forestal

Abstract

The energy transition is already both an environmental political objective and an international diplomacy objective, as well as a technical and economic requirement of national energy matrices. This usually justifies special economic efforts to strategically incentivize renewable energy production, which generally requires the allocation of

resources external to market determinations, either through direct subsidies or other transfer mechanisms. For an adequate formulation and implementation of public policy in this sense, the economic evaluation of potential productive projects is required, in order to model their viability within different possible future contexts, and thus quantify the subsidies eventually required. The objective of this work was to carry out an *ex ante* evaluation, modelling for the last 11 years (2010-2021) the effects generated by changes in economic context conditions (relative prices) on the viability of wood energy plantations with *Eucalyptus grandis* in the northeast region of Argentina. The model is based on the analysis of cash flows, computational optimization and scenarios simulation. The results show that, for most of the time series analyzed, and for average conditions of possible assumptions, the model is non-viable, since the minimum price imposed by the conditions of production and supply of biomass is higher than the maximum price that would compensate the energy transformation unit.

Keywords

Economic evaluation, Simulation models, Bioenergy, Forest biomass

Introducción

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación *ex ante*, modelizando para un periodo de 11 años los efectos que generan los cambios en las condiciones económicas de contexto sobre la viabilidad de plantaciones dendroenergéticas con *Eucalyptus grandis* en el noreste de Argentina. Consideramos que las plantaciones son viables cuando la unidad de negocios de producción de biomasa puede vender la misma a un precio que la unidad de negocios de transformación energética está dispuesta a comprar, sin entrar ninguna en pérdidas. Este instrumento analítico permite entender mejor los determinantes de la competitividad de la producción dendroenergética dentro de la matriz energética nacional, hacer análisis



de sensibilidad, interpretar la evolución temporal reciente de las condiciones de viabilidad económica, y construir escenarios futuros posibles.

Materiales y métodos

La información de base sobre el modelo productivo y los costos se recopiló de experimentos y ensayos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y de empresas forestales locales. Este relevamiento se realizó en el marco de la Consultoría INTA-FAO para establecer el potencial dendroenergético de Argentina [1]. Se asume que las plantaciones de *E. grandis* se establecen en sitios de calidad media a baja, con una productividad estimada de 20-40 m³ha⁻¹año⁻¹ (simulador PlaForNEA [2]). Esta elección de suelos se debe a la premisa de excluir aquellos con potencial para la producción de alimentos [3].

La simulación económica contempla tres rotaciones de 5 años con conducción del rebrote al final de los primeros dos ciclos. La cantidad inicial de plantas es de 2000 ha⁻¹ con una pérdida del 17%, 10% y 10% de las cepas en cada ciclo. El modelo no incluye fertilización, dado que no es una práctica habitual en la actividad forestal actual, aunque es posible que sea necesario mantener la capacidad productiva de los suelos [4] [5] [6]. El control de hormigas y de malezas sigue las prácticas habituales de las forestaciones locales. El sistema de cosecha es manual, exportando solo el fuste y dejando los residuos (copa) en el sitio. El producto final de esta etapa productiva es la madera cosechada en los años 5, 10 y 15. El rendimiento esperado según las simulaciones realizadas con el modelo PlaForNEA es de 122, 110, y 100 Mg ha⁻¹ base seca (bs), para los tres cortes respectivamente. Luego de cada ciclo, la madera cosechada se vende a la central térmica, finalizando la unidad de negocio primaria.

El procedimiento analítico realizado es una evaluación económica *ex ante* del proyecto de inversión simulado, lo cual se repite anualmente para toda la serie temporal 2010-2021. Para cada año se utilizan los precios y variables relevantes, y se calculan los indicadores

económicos, reproduciendo el ejercicio que llevaría a decisores privados a invertir o no en esta actividad. Las variables que se incluyen en el análisis son: el tipo de cambio (ER), el precio de los combustibles fósiles (F), el costo laboral (W) y el nivel general de precios domésticos (DP). Mediante el modelo técnico-económico se obtiene el precio mínimo viable de la biomasa producida (Pmin) y el precio máximo viable de la biomasa que puede pagar la industria productora de energía (Pmax). A igualdad de otras condiciones (ambientales y tecnológicas), estas son las principales fuentes de variación de la viabilidad del proyecto dendroenergético que se está modelando. En el análisis no se incluye el costo de la tierra. Se asume que todas las máquinas empleadas en las tareas forestales (tractor, herramientas de preparación del suelo, etc.) son propiedad del productor. No se contemplan subsidios directos a la plantación.

La metodología para determinar el Pmin consiste en librar como variable de elección el precio mínimo de 1 Mg_{bs} de madera producida, de manera que compense los costos incurridos, haciendo que el valor actual neto (VAN) de todo el flujo de fondos del ciclo se anule para una tasa de descuento dada. Así se realizan simulaciones, obteniendo Pmin para los conjuntos de precios relativos de los años 2010-2021, con dos tasas de descuento de referencia representativas (5% y 10%) pudiendo efectuarse además sobre la misma base un análisis de sensibilidad ante las variables ER, F, y W.

En la construcción de los datos todos los valores son llevados a dólares estadounidenses corrientes (USD), de modo de darle al modelo una mayor capacidad de observación a lo largo del tiempo, en un contexto de importantes variaciones en la tasa de cambio. El año base para los cálculos fue 2017. Los rubros, cuyo precio en el mercado se encuentra relacionado con la tasa de cambio, se dolarizaron al año base. Los combustibles y lubricantes se transformaron en litros de gasoil equivalente en el año base, y siguen las variaciones de ese precio. Los insumos en moneda local, que se reducen básicamente al material de plantación, se ajustan según DP, el índice de precios internos mayoristas (IPIM,



nivel general) promedio de julio de cada año. La contratación de trabajo se cuantificó en jornales equivalentes en el año base, y su precio W se ajusta según la variación oficial de esa categoría en la correspondiente resolución de la Comisión Nacional de Trabajo Agrario (CNTA), Ministerio de Trabajo, de mitad de cada año. Las conversiones de monedas se hacen mediante ER, el tipo de cambio nominal mayorista según el Banco Central de la República Argentina (BCRA) (Comunicación "A" 3500) promedio de julio de cada año.

Una vez modelada la producción de biomasa forestal, se analizó la incorporación de la conversión energética en una central térmica que consume este producto, tomando como base el modelo técnico-económico desarrollado por C. Zaderenko [7]. Del modelo técnico-económico allí presentado, tomamos la variante más competitiva, que es la de una central con una capacidad de entrega de 2 MW en cogeneración (eléctrica-térmica), la cual provee el uso más eficiente de la biomasa entre las alternativas contempladas en el citado trabajo. El procedimiento de modelización fue similar al aplicado para la etapa de producción del cultivo forestal, y las fuentes de variación de las condiciones económicas consideradas fueron también las mismas. Como resultado de este proceso se obtuvieron los coeficientes técnicos que permiten calcular P_{max} , el precio máximo que esta unidad de negocios puede pagar por la biomasa sin entrar en pérdidas.

De forma similar a lo realizado sobre la etapa productiva primaria, en este caso también transformamos las variables que componen egresos e ingresos en valores en USD, con los mismos criterios de ajuste por variaciones salariales, de precios internos, y dolarización directa, según el tipo de costo operativo. Los ingresos derivan de las ventas de energía a la red nacional, y se efectúan mediante contratos denominados en USD. El precio de la biomasa a consumir, simétricamente con nuestro ejercicio anterior, fue librado como variable de elección. Así, bajo las condiciones de precios de cada año, las sucesivas simulaciones resultan en precios máximos que la industria puede pagar por la madera, dado el precio fijo de venta de la energía eléctrica a entregar, y descontando de los costos aquel imputable a la energía térmica cogenerada. En consecuencia, para poder evaluar el punto

límite de la viabilidad de esta unidad de negocios, buscamos el precio de la biomasa a comprar para la cual el margen neto de esta etapa se anula.

Para el análisis se toman los siguientes posibles precios a cobrar por la energía eléctrica generada: 1) un valor mínimo de 108 USD MWh⁻¹ (P108), 2) un valor máximo de 143USD MWh⁻¹ (P143) y 3) uno intermedio de 130 USD MWh⁻¹ (P130). Estos valores surgen de las licitaciones de energía renovable vigentes en Argentina, en el marco del Plan del Ministerio de Energía (RENOVAR). En todos los casos estos precios resultan subsidiados con respecto al precio de mercado general de la energía. Si bien los proyectos adjudicados en RENOVAR no estaban activos antes del año 2017, la referencia es igualmente útil en términos comparativos. También tomamos como valor orientativo un precio medio de energía mayorista de referencia del mercado eléctrico de Argentina (P74), cuyo ente administrador es una empresa Público-Privada (CMMESA), que se encarga de la compra y regulación de la provisión mayorista a las empresas distribuidoras a nivel nacional. Este último precio era de 74,5 USD MWh⁻¹ en enero 2022.

Resultados

Para el año 2021, encontramos que el precio mínimo (Pmin) que hace viable la producción de biomasa, resulta de 32,7 USD Mg_{bs}⁻¹ para una tasa de descuento del 5%, y 37,0 USD Mg_{bs}⁻¹ para una tasa del 10%, mientras que el precio máximo (Pmax) que hace viable su transformación energética está entre 30,6 y 44,7 USD Mg_{bs}⁻¹ para el rango de precios subsidiados de la energía eléctrica considerado. Las estructuras de costos resultantes se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Composición relativa de Pmin y Pmax para el año 2021

Pmin	Pmax
------	------



% del total	Tasa de descuento		% del total	
	5%	10%		
Salarios	32,0	32,9	Salarios	14,8
Combustibles y lubricantes fósiles	24,3	22,6	Biomasa	51,4
Amortizaciones del equipamiento	14,8	14,6	Amortizaciones y mantenimiento	18,2
Costo de uso de equipamiento	11,5	10,4	Logística y operaciones	15,6
Impuestos específicos y otros gastos	4,9	4,9		
Material de plantación	5,7	7,4		
Administración	4,8	4,7		
Otros (agroquímicos)	2,1	2,5		
Total	100,0	100,0		100,0

Se puede apreciar que un aumento en la tasa cambia en cierta medida la estructura de costos de Pmin, ya que según el perfil temporal de los gastos, se modifican las ponderaciones en el cálculo del valor presente. En el caso de Pmax, al ser originado en un cálculo de margen y no en el análisis de un flujo de fondos plurianual, no se hace esta diferenciación. El componente principal de los costos de transformación energética es la biomasa, que en la usina seleccionada de 2 MW explica el 51% del total.

Repetiendo el ejercicio propuesto para todos los años de la serie, completamos la matriz de resultados, que acompañamos con las variables utilizadas en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Variables explicativas y resultados de Pmin y Pmax

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ER (\$/USD)	3,9	4,1	4,6	5,4	8,2	9,0	14,1	17,2	27,6	43,8	69,5	95,3

W (USD)	46,8	55,8	60,7	62,5	56,7	66,4	54,3	61,4	46,1	44,7	40,0	35,0
DP	46,0	51,8	58,4	66,4	84,9	96,4	130,2	148,3	218,2	335,2	484,4	789,5
F (USD)	0,8	0,9	1,2	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	0,9	1,0	0,7	1,0
Pmin5 (USD/Mg)	36,0	39,5	43,6	45,3	43,2	45,9	40,7	41,9	35,8	35,8	32,2	32,7
Pmin10 (USD/Mg)	41,3	45,4	49,9	51,7	49,1	52,3	46,2	47,8	40,7	40,5	36,5	37,0
Pmax108 (USD/Mg)	26,8	23,8	22,2	21,7	23,6	20,4	24,3	22,0	27,0	27,4	29,0	30,6
Pmax130 (USD/Mg)	35,6	32,6	31,1	30,5	32,4	29,2	33,1	30,8	35,8	36,2	37,8	39,4
Pmax143 (USD/Mg)	40,8	37,9	36,3	35,7	37,6	34,5	38,4	36,1	41,0	41,5	43,0	44,6
Pmax74 (USD/Mg)	13,4	10,4	8,8	8,3	10,1	7,0	10,9	8,6	13,6	14,0	15,6	17,2

ER siguió una tendencia alcista durante toda la serie temporal con una aceleración importante desde el año 2015. Este importante cambio en los precios relativos en la macroeconomía nacional fue acompañado por una evolución de los salarios en pesos que por momentos acompañó el ritmo devaluatorio y en otros no lo hizo. Por esto el signo de las variaciones de W (valorizado en USD) surge del resultado neto entre dichos efectos. Algo similar sucedió con el índice de precios internos (DP). Desde el año 2010 a 2015 el tipo de cambio aumentó un 130% en tanto que el salario en pesos aumentó un 226% y los precios internos un 109%. Por otro lado, desde 2015 a 2021 el tipo de cambio aumentó un 954% mientras los salarios en pesos aumentaron un 455% y los precios 722%. La evolución de los precios de combustibles (F) acompaña al tipo de cambio pero por momentos se diferencia, acelerando o desacelerando el crecimiento, debido a cambios en las regulaciones internas. A lo largo del periodo simulado vemos que el Pmin subió de 36 a 45,9 USD Mg⁻¹ (para una tasa del 5%) desde el año 2010 a 2015, bajando hasta 32,7 USD Mg⁻¹ en el año 2021. Para una tasa de 10% el Pmin subió de 41,3 USD Mg⁻¹ a un máximo de 52,3 USD Mg⁻¹ desde el



año 2010 a 2015, bajando hasta 37,0 USD Mg⁻¹ en el año 2021. El precio en pesos es siempre ascendente.

Para interpretar estos resultados correctamente debe considerarse, entre otros aspectos, que el modelo está planteado como una opción de inversión sobre un costo de la tierra ya asumido, y que el valor de cada precio obtenido es un mínimo que equilibra el valor actual del flujo de fondos a la tasa de descuento dada, por lo que una vez compensado el costo de oportunidad financiero, no implica ganancias. Esto significa que, bajo estas condiciones técnicas, los precios de mercado reales esperados serían necesariamente superiores para que la actividad fuera considerada viable.

Como se observa gráficamente en la Figura 1, para la mayor parte de los años de la serie, y para las condiciones medias de los distintos escenarios de supuestos posibles, el modelo no resulta viable. Si bien hay algunas excepciones, el precio mínimo que imponen las condiciones de producción y oferta de biomasa (Pmin) es superior al precio máximo que puede llegar a compensar la etapa de transformación (Pmax) para la mayor parte de las comparaciones posibles.

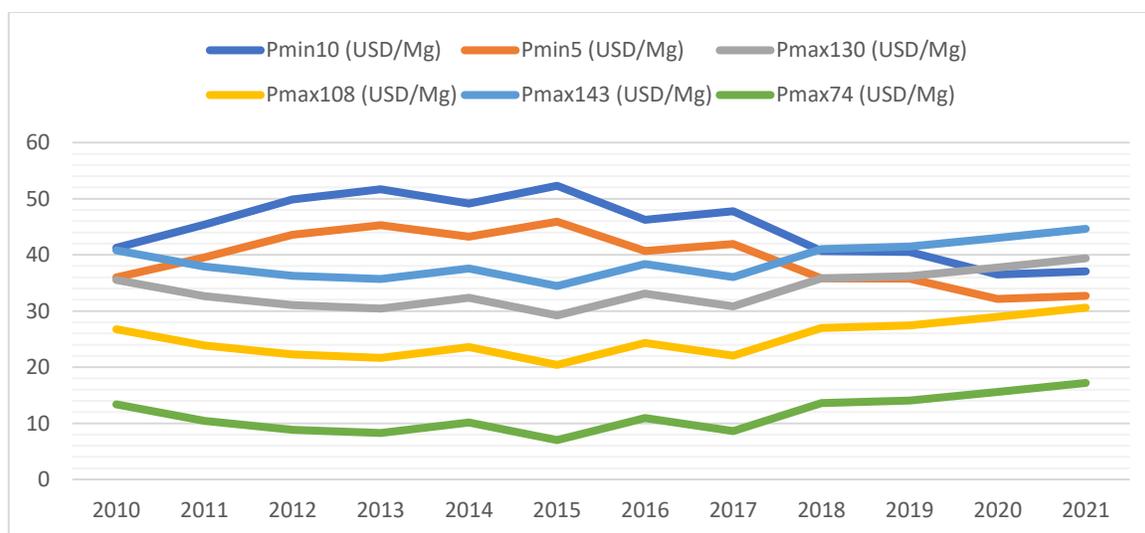


Figura 14: Evolución Pmin y Pmax

Al analizar la evolución de Pmin10 y Pmin5, en comparación con Pmax143 vemos que la producción dendroenergética sólo podría acercarse a ser viable desde el año 2018. A partir de ese año, bajo condiciones altamente exigidas, el proyecto hipotético mostraría cierto margen de viabilidad al precio con el mayor subsidio (Pmax143), y para tasas de descuento dentro del rango analizado (5%-10%). La comparación de los Pmin con Pmax108 (el menor de los precios subsidiados) muestra directamente inviabilidad para toda la serie, mientras que siguiendo a Pmax130 (el Pmax con subsidio intermedio), este supera a Pmin5 y Pmin10 en los últimos 3 y 2 años respectivamente. Cualquier comparación que se realice con el Pmax74 nos muestra que está muy lejos de ser viable la producción dendroenergética sin subsidio específico.

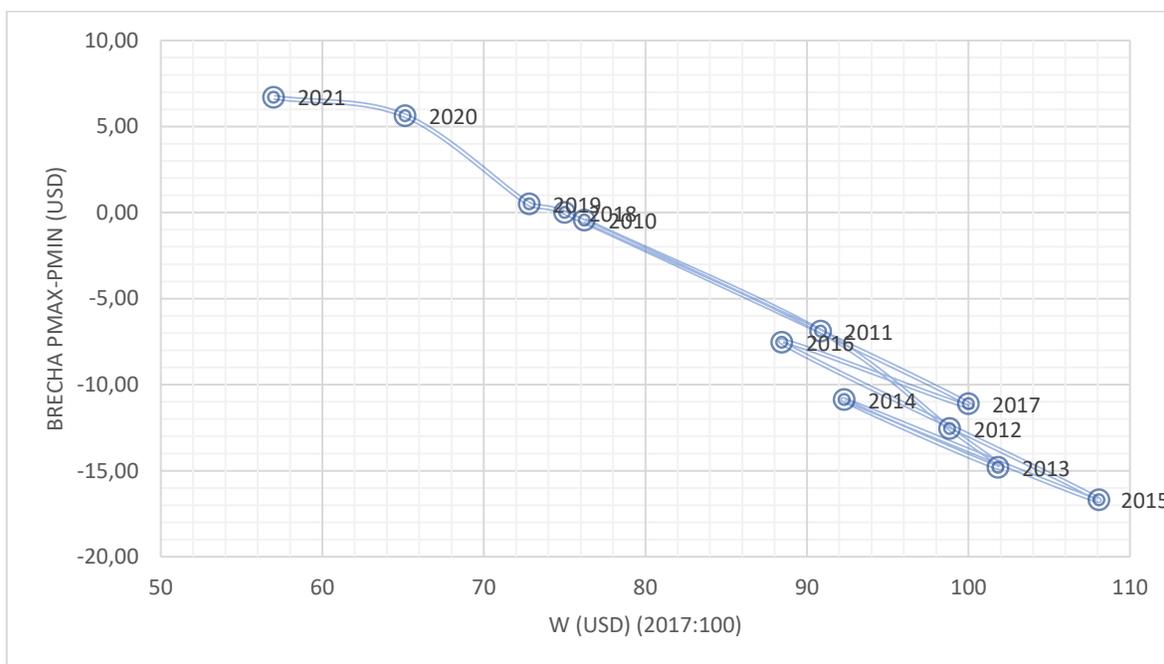


Figura 15: Brecha entre Pmin y Pmax, y salarios en USD años 2010-2021

Luego de analizar detenidamente los cambios en las condiciones económicas año a año, y sus respectivos resultados, centramos el interés en la relación entre los precios límite calculados, la evolución de los salarios y el tipo de cambio. Para acotar la observación al



principal foco de interés, construimos la variable *brecha* entre los precios máximos y mínimos, que es la diferencia simple entre un precio máximo y un precio mínimo seleccionados. La decisión de cuál tomar entre cada grupo no impacta significativamente sobre los resultados, ya que el principal interés es sobre las variaciones, y no sobre el nivel. En este caso optamos por calcular $brecha = P_{max130} - P_{min5}$.

Luego de efectuar una serie de ensayos de hipótesis alternativas buscando explicar la nueva variable *brecha*, se encontró que la relación más firme se observa entre esta y W. Como se puede observar en la Figura 2, existe una clara relación lineal negativa a lo largo de una década simulada; es decir, las variaciones positivas en el salario en dólares se relacionan con variaciones negativas en la brecha de precios, o sea, con un empeoramiento de las condiciones de viabilidad económica de la producción dendroenergética. Además, se puede observar que el tránsito por esta relación a través de los años no es monótono, sino que se muestra oscilante, a través de sucesivos saltos. Desde 2010 hasta 2013 la brecha desciende, tras lo cual zigzaguea en la zona de inviabilidad entre -7 y -17 USD hasta 2017, para luego saltar en 2018 hasta ser prácticamente 0, y seguir aumentando hasta 2021.

Hacia los últimos tres años de la serie se ve un mejoramiento de las condiciones de viabilidad, simultáneamente con un contexto de devaluación con recesión, lo cual entre otros aspectos produce una devaluación firme en términos reales, y que se manifiesta, por ejemplo, en una balanza comercial creciente, que en ese período cambió de signo.

Conclusiones y discusión

La evaluación de proyectos dendroenergéticos en Argentina no escapa a las condiciones que aplican a cualquier proyecto de inversión en países con inestabilidad económica donde, para hacerse efectivos, resultan muy exigentes en rentabilidad. En nuestro modelo, los precios a los que potencialmente se puede ofrecer la biomasa atentan contra la viabilidad. Nuestros resultados se muestran similares a la experiencia internacional reciente, y no

solamente de países en desarrollo [8] [9] [10] [11] [12]. La diferencia observada entre el precio mínimo que hace viable la producción de biomasa para distintas tasas de descuento, que nosotros ejemplificamos en 5% y 10%, da cuenta de la influencia cuantitativa de las condiciones financieras en un proyecto de este tipo. Esto se explica por la duración de estos proyectos, erogándose los gastos mayormente al comienzo y recibiendo los ingresos al final de cada ciclo forestal. La experiencia de estudios previos muestra que estos proyectos suelen ser altamente sensibles a las tasas de descuento consideradas [13] [14].

Para la mayor parte de los años de la serie 2010-2021, si consideramos que los proyectos dendroenergéticos son potencialmente evaluados por iniciativas privadas de inversión dispuestas a tomar riesgos y con la expectativa de obtener ganancias, dadas las premisas básicas del modelo, difícilmente se pueda argumentar en favor de su viabilidad. Los puntos de la serie que superan este desafío son aquellos en que los costos internos quedan excepcionalmente bajos, producto de devaluaciones sin recomposición salarial. Desde el análisis de las inversiones potenciales cabe preguntarse si estas condiciones son estructuralmente sostenibles. Los tres precios de energía eléctrica resultantes de RENOVAR (P108, P130, P143) incluyen un subsidio por parte del Estado respecto del precio de mercado de la energía en el país; en el menor de ellos (P108) el subsidio es de más del 45%. Este subsidio, sin embargo, se suele justificar, por las externalidades que se contemplan para este tipo de producción de energía [15], y por el carácter de incentivo estratégico. En cuanto a esto último, el incentivo es para el desarrollo y perfeccionamiento a lo largo del tiempo de las condiciones en que se produce; para en el futuro, acaso, poder aumentar la eficiencia económica del sector mediante una maduración tecnológica y del entramado productivo, de forma tal que ya no necesite subsidio o lo haga en menor medida.

La brecha entre P_{min} y P_{max} , con su tendencia lineal y negativa a lo largo de una década, - con todos los cambios macroeconómicos y también cambios de ciclo político- propone que la viabilidad de proyectos dendroenergéticos en la Argentina se asocia en forma directa a



la competitividad macroeconómica nacional general. Si bien toda interpretación de estas observaciones conlleva de alguna manera un modelo macroeconómico subyacente, podemos ensayar una hipótesis interpretativa: cuando las devaluaciones nominales del peso fueron firmemente acompañadas por *passthrough* en los precios internos, en contextos de crecimiento económico y recomposición de salarios registrados, se alcanzaron los mayores valores de salarios en dólares de esta serie, y las peores condiciones de viabilidad del proyecto; mientras que cuando las devaluaciones nominales ocurrieron en contextos más recesivos, los salarios y costos internos ajustaron a la baja en dólares, afectando positivamente la brecha de precios objetivo. En síntesis, en una situación dinámica con tipos de cambio que se mantuvieran competitivos sin (demasiado) *passthrough* de costos internos, la brecha de precios se acercaría a la viabilidad, mientras que en caso contrario, la brecha reaccionaría empeorando las condiciones para este tipo de proyectos.

Por último, ubicándonos en una perspectiva más global, y acaso en un horizonte de mayor alcance, proponemos no perder de vista que mientras se avanza en la producción de dendroenergía, así como en las otras formas de bioenergía, estratégicamente es conveniente ir transitando el sendero hacia un mejor aprovechamiento de los materiales y su respectivo potencial específico. Esto es en cierta forma moderno, pero ya no es nuevo; y en la Argentina hay importantes capacidades científicas y tecnológicas al respecto. Esta necesidad se refuerza especialmente si, además de poner el foco en la evaluación de viabilidad económica, se toman en consideración las visiones críticas acerca de los impactos socio-económicos en general de la bioenergía, que son de difícil evaluación *ex ante* [16], pero que están en la agenda pública.

Agradecimientos

A Patricia Egolf, Karina Casellas, Roberto Fernandez, Hugo Fassola, Constantino Zaderenko, Gustavo Braier, Programa Nacional Forestales INTA, Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG).

Referencias

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina, Colección Documentos Técnicos N° 18. Buenos Aires, 2020. <https://doi.org/10.4060/ca8031es>.
- [2] H. Fassola, E. Crechi, A. Keller, L. Colcombet, S. Barth, R. Winck, J. Di Rienzo, F. Pascual, Plataforma de Gestión Forestal, Versión 1.0. PlaForNea. Simulador de crecimiento y producción a nivel rodal de las principales especies forestales cultivadas en la Mesopotamia Argentina, INTA, 2013.
- [3] P. McMichael, “Agrofuels in the food regime”, *The Journal of Peasant Studies*, 37:4, 609-629, 2010. DOI: 10.1080/03066150.2010.512450.
- B. Ribeiro, “Beyond commonplace biofuels: social aspects of ethanol”, *Energy Policy* 57, 355–362, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.004>.
- [4] J. Frangí, C. Pérez, J. Goya, N. Tesón, M. Barrera, M. Arturi, “Experimental model of a Eucalyptus grandis plantation in Concordia, Entre Ríos”, *Bosque*, 37(1), 191-204, 2016. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000100018>.
- [5] H. Junior, R. de Melo, M. Sartori, S. Guerra, A. Ballarin, “Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy”, *Biomass and Bioenergy*, 90, 15-21, 2016.
- [6] F. Resquin, R. Navarro-Cerrillo, L. Carrasco-Letelier, C. Casnati, L. Bentancor, “Evaluation of the nutrient content in biomass of Eucalyptus species from short rotation plantations in Uruguay”, *Biomass and Bioenergy*, 134, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105502>.
- [7] FAO, 2020, op cit. [1]
- [8] S. Hauk, T. Knoke, S. Wittkopf, “Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.103>.
- [9] G. San Miguel, B. Corona, D. Ruiz, D. Landholm, R. Laina, E. Tolosana, H. Sixto, C. Cañellas, “Environmental, energy and economic analysis of a biomass supply chain based on a poplar short rotation coppice in Spain”, *Journal of Cleaner Production*, 94, 93-101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.070>.*
- [10] S. Pereira, M. Costa, M. Graça Carvalho, A. Rodrigues, “Potential of poplar short rotation coppice cultivation for bioenergy in Southern Portugal”, *Energy Conversion and Management*, 125, 242-253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.068>.



- [11] E. Acuña, R. Rubilar, J. Cancino, T. Albaugh, C. Maier, “Economic assessment of Eucalyptus globulus short rotation energy crops under contrasting silvicultural intensities on marginal agricultural land”, *Land Use Policy*, 76, 329-337, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.028>.
- [12] P. Chudy, H., Sjølie, G. Latta, B. Solberg, “Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway”, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34:3, 218-227, 2019. DOI: 10.1080/02827581.2019.1578403.
- [13] R. Finger, “Assessment of uncertain returns from investment in short rotation coppice using risk adjusted discount rates”, *Biomass and Bioenergy* 85: 320-326, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.028>.
- [14] S. Pereira, M. Costa, M. Graça Carvalho, A. Rodrigues, “Potential of poplar short rotation coppice cultivation for bioenergy in Southern Portugal”, *Energy Conversion and Management*, 125, 242-253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.068>.
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Valorización de externalidades de proyectos con biomasa seca y biogás, Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires, 2020. <https://doi.org/10.4060/ca8761es>.
- [16] M. Brinkman, B. Wicke, A. Faaij, F. van der Hilst, “Projecting socio-economic impacts of bioenergy: Current status and limitations of ex-ante quantification methods”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109352, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109352>.

Una revisión sobre las tecnologías de revalorización de residuos vitivinícolas

A review of technologies for the revaluation of wine waste

Carlos Eduardo Guzmán-Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro. México

dcicarlos@gmail.com

[ORCID https://orcid.org/0000-0002-3404-2650](https://orcid.org/0000-0002-3404-2650)

Oscar Daniel Lara-Montaña

Universidad Autónoma de Querétaro. México

od.laramontano@gmail.com

[ORCID https://orcid.org/0000-0003-2055-1216](https://orcid.org/0000-0003-2055-1216)

Claudia Gutiérrez-Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro. México

claugtez@gmail.com

[ORCID https://orcid.org/0000-0002-7557-2471](https://orcid.org/0000-0002-7557-2471)

Resumen

A nivel global, la producción de vino es una actividad de gran impacto económico; en consecuencia, se generan cantidades considerables de residuos, tanto líquidos como



sólidos, los cuales ocasionan problemas ambientales severos y daños a la salud. Sin embargo, los compuestos causantes de dichos problemas pueden ser recuperados y utilizados para mejorar distintos procesos, o ser transformados en productos de alto valor agregado. Así, con el fin de conocer el estado del arte actual en la revalorización de residuos vitivinícolas se realiza una revisión bibliográfica sobre las tecnologías y áreas de oportunidad existentes. Los resultados muestran que los residuos sólidos son revalorizados en distintos sectores, entre los que se encuentran alimentación animal, alimentación humana, medicina, desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones en los sectores agrícolas, biotecnológicos y de remoción de contaminantes. Por su parte, la revalorización de los efluentes vinícolas ha sido enfocada en la producción de biomasa, materiales orgánicos, biogás, biodiésel, biohidrógeno, biosurfactantes, así como enzimas. En general, los procesos de revalorización incluyen tecnologías biológicas y químicas, que posibilitan generar una gran diversidad de productos con diferentes aplicaciones. Estas áreas de oportunidad permitirán mejorar la eficiencia energética y material de los procesos de revalorización, disminuyendo, al mismo tiempo, su impacto ambiental y aumentando su rentabilidad. A su vez, esto permitirá el procesamiento de los residuos de la industria vitivinícola para contribuir al desarrollo sostenible.

Palabras clave

Conversión de residuos; residuos vitivinícolas; revisión bibliográfica; tecnologías de revalorización.

Abstract

Worldwide, wine production is an activity of great economic impact; consequently, considerable amounts of waste, both liquid and solid, are generated, which cause severe environmental problems and damage to health. However, the compounds that cause these problems can be recovered and used to improve different processes or be transformed into high value-added products. Thus, in order to know the current state of the art in the revaluation of wine waste, a bibliographic review is carried out on existing technologies and

areas of opportunity. The results show that solid waste is revalued in different sectors, including animal feed, food, medicine, development of new materials with applications in the agricultural sectors, biotechnology and pollutant removal. Meanwhile, the revaluation of wine effluents has been focused on the production of biomass, organic materials, biogas, biodiesel, biohydrogen, biosurfactants, as well as enzymes. In general, the revaluation processes include biological and chemical technologies, which allow to generate a great diversity of products with different applications. These areas of opportunity will improve the energy and material efficiency of the revaluation processes, while decreasing their environmental impact and increasing their profitability. Indeed, this will allow the wine industry to process its own waste, and contribute to sustainable development.

Keywords

Waste conversion; wine residues; literature review; revaluation technologies.

Introducción

En las últimas dos décadas, ha aumentado bastante el interés por la sustentabilidad; incluso, se considera una pieza clave en el diseño de nuevos procesos. Esta tendencia es ampliamente impulsada por una creciente conciencia ambiental y, lamentablemente, por una decreciente disponibilidad de recursos naturales. Como resultado de una mayor atención a la sustentabilidad una amplia variedad de tecnologías se ha desarrollado para la revalorización de residuos industriales. La revalorización se puede definir como el proceso de remediación y/o tratamiento de residuos acoplado a la recuperación o producción de compuestos de alto valor. En otras palabras, la revalorización es el proceso de generar nuevos productos empleando a los residuos como materia prima; esto permitirá reducir costos, disminuir el impacto negativo al ambiente, y abastecer una necesidad en el mercado.



En particular, la industria vitivinícola es la segunda mayor generadora de agua residual del sector agroindustrial después de la industria del papel [1]. Aproximadamente, la relación es de 12-15 litros de agua residual por litro de etanol producido. Este efluente es conocido también como vinaza. Si se caracterizan las aguas residuales vinícolas, así como todos sus residuos sólidos se identifica [1] una alta carga orgánica constituida principalmente por carbohidratos, alcoholes y ácidos, además polifenoles, taninos, melanoidinas y lignina. Los efluentes pueden ser utilizados como fertilizante debido a las particularidades mencionadas; sin embargo, su esparcimiento directo en el ambiente puede contaminar los suelos y cuerpos de agua debido justamente a esta elevada carga orgánica la cual podría llegar a ser tóxica bajo ciertas condiciones.

Por otra parte, los fenoles y polifenoles tienen efectos negativos sobre los microorganismos y plantas en los sitios de disposición final de los efluentes vinícolas; esto debido a que se consideran fitotóxicos, antimicrobianos y recalcitrantes. Los componentes que proporcionan color al vino impiden que la luz solar penetre en ríos y lagos; de esta manera se reduce la actividad fotosintética y la concentración de oxígeno disuelto en el agua, causando condiciones peligrosas para la vida acuática. Además, el alto contenido orgánico puede causar problemas en las aguas superficiales a través del incremento de nutrientes. Este aumento puede llevar al ecosistema a cambios estructurales y funcionales indeseables; sin contar los malos olores y putrefacción que se genera. Por si no fuera poco, se ha reportado inhibición en la germinación de semillas, reducción en la alcalinidad del suelo y menor disponibilidad de magnesio debido al uso de aguas residuales vinícolas en la agricultura [1].

Metodología

Con el fin de conocer el estado del arte actual en la revalorización de residuos vitivinícolas se realiza una revisión bibliográfica sobre las tecnologías y áreas de oportunidad existentes. Dicha búsqueda es realizada en bases de datos con estricto arbitraje, tales como Elsevier,

American Chemical Society, Springer, Wiley, National Center for Biotechnology Information, entre otras. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron: grape waste conversion, wine residues reuse, distillery waste revalorization, winery waste water treatments, así como combinaciones entre las palabras antes mencionadas.

Con base en los resultados de la búsqueda se seleccionaron aquellos artículos que cumplieran al menos con uno de los siguientes puntos: 1) ser único en su área/sector de conocimiento; 2) si la aplicación ha sido muy explorada, contar con la mayor cantidad de citas; 3) si el área de conocimiento ha sido muy explorada, contar con una aplicación o potencial innovador.

Resultados

Como resultado de la recopilación bibliográfica, se encuentra que los residuos se generados lo largo de todo el proceso productivo, Figura 1; éstos se pueden caracterizar como hojas, tallos, orujo, semillas, vinaza y lías de uva [2]. La revalorización se puede categorizar en los siguientes sectores: agricultura, salud, desarrollo de nuevos materiales, nutrición animal, nutrición humana, aplicaciones biotecnológicas, energía, desarrollo de nuevos procesos y tecnología de alimentos.

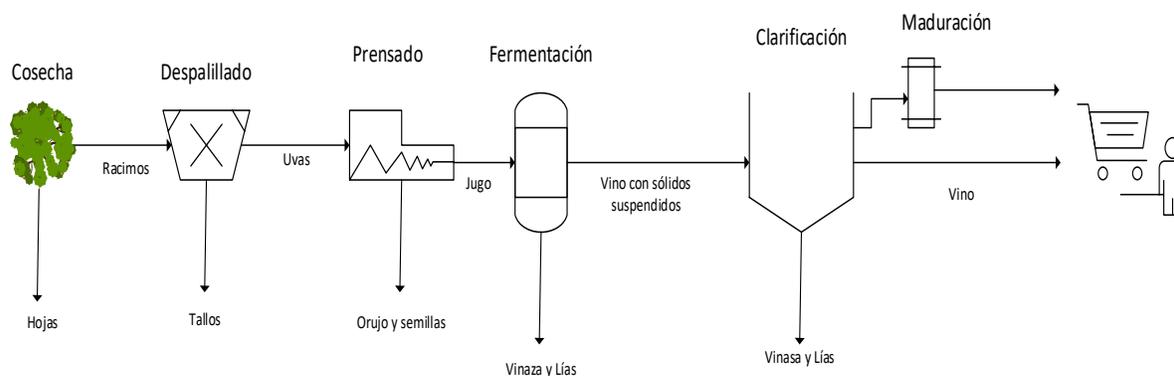


Figura 1.-Proceso general vitivinícola.



Cabe mencionar que las investigaciones citadas en esta revisión bibliográfica son aquellas que cumplieron con el criterio de selección. El Cuadro 1 presenta la información recabada, resaltando la principal aportación y el sector para el cual ha sido revalorizado.

Cuadro 1.- Concentrado de investigaciones por sector.

Sector	Autor	Aportación	Ref.
Agricultura	Gómez M. et al.	Vermicomposta	3
	Troncozo M. et al.	Biofertilizante	4
	Olejar K. et al.	Biofertilizante	5
Salud	Gil R. et al.	Clarificantes no alérgenos	6
	Pistol G. et al.	Prebióticos / antiinflamatorios	7
	Rivera K. et al.	Harina / Reducción enfermedades coronarias	8
	Torres E et. al.	Aditivo dentífrico / problemas periodontales	9
	López R. et al.	Efecto antihipertensivo	10
	Fernández Z. et al.	Agentes preventivos de hepatocarcinoma	11
	Martins I. et al.	Actividad antiinflamatoria intestinal	12
	Christofolletti C. et al.	Modulación del síndrome metabólico	13
Materiales	Fan Q. et. al.	Nano geles / implantes médicos	14
	Iglesias A. et. al.	Bioadsorbentes de plomo	15
	Belayachi H. et. al.	Soporte de fotocatalizador	16
	Carbone K. et. al.	Asistente proceso verde. Producción dentífrico	17
	Varelas V. et al.	Obtención de β -glucano	18
	Gowman A. et al.	Biocomposito poly(butilen succinato) BioPBS	19
Nutrición animal	Ianni A. et. al.	Estabilizante oxidativo de carne bovina	20
	Zhang R. et. al.	Eliminación apoptosis epitelial de corderos	21
	Pauletto M. et. al.	Refuerzo inmune en vacas lecheras	22
	Chedea V. et. al.	Actividad antioxidante en hígado y riñones de lechones	23
	Cámara J. et al.	Alimento para pez	24
Nutrición Humana	Abdelhakam O. et. al.	Aditivo para carne de hamburguesa	25
	Ortega M. et. al.	Sazonador pechugas de pollo	26
	Tolve R. et. al.	Pasta fortificada	27
	Aizpurua O. et al.	Extracción de ácidos grasos con fluidos supercríticos	28

	da Rocha C. et al.	Capsulas de antocianina	29
	Theagarajan R. et al.	Galletas nutraceuticas	30
Biotecnología	Olejar K. et al.	Bactericida	31
	Papadaki A. et al.	Producción de enzimas	32
	Junior J. et al.	Producción de lacasa	33
	Naspoli B. et al.	Producción de biosurfactante	34
	Pérez B. et al.	Medio de cultivo para <i>Debaryomyces hansenii</i>	35
		Salgado J. et al.	Producción de lipasas, proteasas y tanasas
Biotecnología	García J. et al.	Efecto antimicrobiano y bacteriostático	37
	Ruiz M. et al.	Actividad antimicrobiana en los tallos de uva	38
	Groff M. et al.	Producción de ácido láctico	39
	Mewa M. et al.	Medio de cultivo producción de conservadores	40
		kopsahelis N. et al.	Biorrefinería. Polifenoles, etanol y sales tartáricas
Procesos	Kontogiannopoulos K.	Obtención de ácido tartárico y polifenoles por filtración	42
	Ozdemir I. et al.	Producción de carbón activado	43
		Buitrón G. et al.	Biogás
Energía	Eder A. et al.	Producción de hidrógeno y ácidos grasos volátiles	45
	Basso D. et al.	Formación de biocarbón	46
	Zhang N. et al.	Producción de biocarbón, bio-oil y biogás	47
		Lou W. et al.	Aditivo harina de trigo para panadería
Tecnología de alimentos	Kuchtová V. et al.	Aditivo para galletas	49
	Pavlou A. et al.	Emulsificante para yogurt	50
	Spinei M. et al.	Obtención de pectina	51
	Bender A. et al.	Muffins nutraceuticos	52

En función a las investigaciones del Cuadro 1, se compara gráficamente la cantidad de proyectos obtenida para cada sector sobre el total a través de la Figura 2. Estos valores representan la tendencia en revalorización y las áreas de oportunidad existentes para futuras contribuciones.



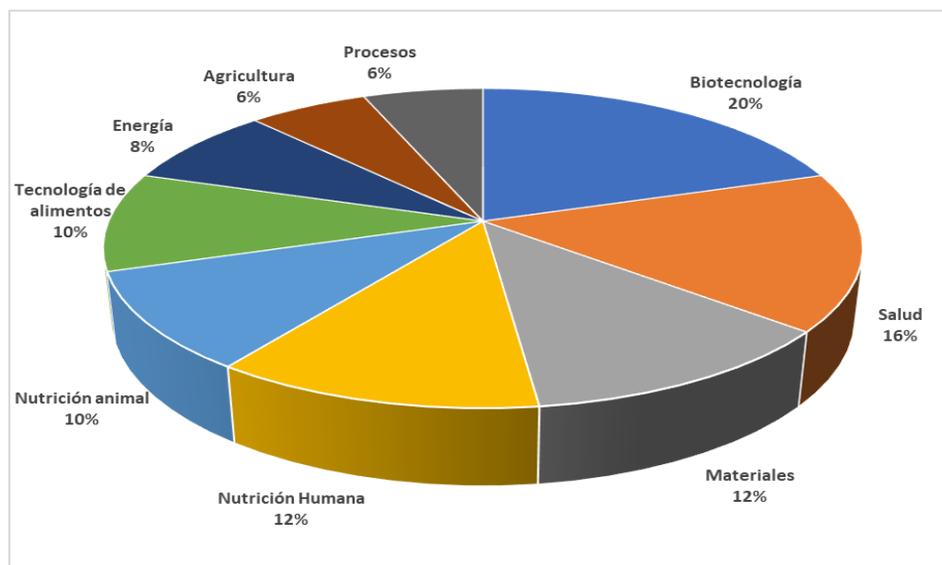


Figura 2.- Sectores de revalorización

Discusión

El sector en el que más contribuciones se reportan es el de biotecnología, en donde el uso de estos residuos se reporta como medio de cultivo o factores de enriquecimiento para la producción de distintas enzimas de valor industrial; en segundo lugar se encuentra la producción de moléculas de valor agregado (como el ácido láctico). Por otro lado, las propiedades antimicrobianas obtenidas por los polifenoles se han vuelto atractivas por sus diversas aplicaciones, principalmente en la conservación de alimentos. Por otra parte, en el sector salud los residuos se han revalorizado para extraer el contenido de antioxidantes (tal es el caso de la antocianina y polifenoles) o la fibra presente en ellos. Es interesante resaltar el caso de la investigación de Gil R. et al. [6], quien presenta aportación no sólo en el sector de la salud, sino también en el área de procesos; esto se debe a que el clarificante de vinos no es alérgico y tiene el potencial de disminuir los costos de materia prima por obtenerse de un residuo. En el sector de materiales se ha mostrado el enorme potencial de la revalorización al transformar lo que se considera como basura en productos de alto valor, por ejemplo: nano cristales de celulosa para implantes médicos [14], soporte para fotocatalizadores [16], así como polímeros biodegradables con el potencial de sustituir el PVC, PE y PP [19]. Además, este sector tiene impacto en otros como el ambiental e

indirectamente la salud; por ejemplo, si existe una disminución de metales pesados, como el plomo, mediante el uso de bioadsorbentes [15], se previenen patologías no infecciosas en las poblaciones circundantes al lugar de exposición del metal. En la nutrición, tanto humana como animal, se busca aprovechar los componentes antioxidantes, y, con ello, contribuir a la prevención de patologías. Por ejemplo, el ser humano lo utiliza como un prebiótico, mientras que los animales, como los rumiantes, lo utilizan como alimento.

Un reto interesante que existe en el sector de la nutrición humana es que los alimentos con componentes obtenidos de revalorización no comprometan las propiedades sensoriales de los alimentos. El alimento puede tener propiedades nutraceuticas, pero si tiene un mal aspecto, aroma o sabor, no será consumido. Otro reto importante en la nutrición, tanto humana como animal, es que el alimento debe ser inocuo; de lo contrario, pierde su contribución en este sector. Un ejemplo de inocuidad es la aportación del trabajo de Aizpurua O. et al. [28] en la nutrición humana, la cual se centra en la obtención de ácidos grasos esenciales provenientes del hueso de la uva mediante la extracción por fluidos supercríticos. La ventaja del método implementado es que utiliza un solvente (CO_2 supercrítico) ambientalmente seguro, inerte y no tóxico. Los principales aportes en la tecnología de alimentos incluyen la mejora de propiedades reológicas de masas de panadería/galletas, así como la funcionalización de los alimentos mediante los antioxidantes existentes en el orujo de uva. El principal reto para este sector es conservar las propiedades funcionales después de los tratamientos térmicos a los que son sometidos alimentos.

Por otra parte, las propiedades gelificantes en los productos de revalorización [50, 51] representan un aporte significativo al sector de alimentos. Esto se debe a la reducción de reprocesos y rechazos por sinéresis. La sinéresis es el efecto de liberación de agua no ligada al alimento, y genera un defecto de calidad, el cual altera tanto las propiedades reológicas, que puede propiciar una contaminación microbiológica.



En sector de la energía, se ha reportado la obtención de biocombustibles gaseosos, líquidos y sólidos a partir de residuos vitivinícolas [44-47]. Los energéticos más frecuentes son el biogás y el biocarbón, obtenidos por métodos biológicos y térmicos. Aunque se obtienen biocombustibles líquidos como el bio-oil producto de la pirólisis [47], se requiere aumentar la oferta de éstos. El reto se centra en lograr obtener procesos energéticamente favorables, seguros y con mínimo impacto ambiental. Este desafío no es exclusivo de la revalorización de desechos vitivinícolas, sino de cualquier materia orgánica que se desee revalorizar en este sector. Ahora bien, la revalorización en el sector agrícola es limitada y esto se atribuye a los efectos fitotóxicos de los residuos (tanto orujo como vinazas). Por lo tanto, las investigaciones en este sector deben direccionarse a eliminar estos componentes, tal es el caso del trabajo reportado por Olejar K. [5].

El sector de procesos se encuentra muy centrado en la separación de moléculas existentes en los residuos, con excepción de trabajos enfocados en la producción de carbón activado [43]; sin embargo, el desafío se encuentra en no sólo extraer ciertas moléculas de valor agregado, sino también incursionar en la transformación de esos compuestos para la obtención de otros productos en esquemas de biorrefinería. Es importante mencionar que, en las investigaciones recopiladas, en todos los sectores no se realizan evaluaciones o aproximaciones económicas de las propuestas. Esta omisión impide monetizar el proceso de revalorización y con ello no transmitir de manera óptima la magnitud del impacto.

Aunque hay una gran diversidad y cantidad de proyectos enfocados a la revalorización de residuos vitivinícolas, existen áreas de desarrollo por explorar y explotar en todos los sectores. A través de la ingeniería de procesos es posible proponer nuevos procedimientos, intensificar u optimizar los ya existentes; incluso, es factible hacer evaluaciones y comparaciones, entre metodologías, desde el punto de vista económico, ambiental, de operabilidad (con un enfoque en el control de procesos) y de seguridad.

Conclusiones

Como conclusión, mediante la aplicación de diversas técnicas y tecnologías es factible la revalorización de residuos vitivinícolas, en productos de valor agregado; lo anterior con el objetivo de aumentar los beneficios económicos para las empresas y disminuir la carga ambiental por la disposición no adecuada de estos residuos. Para finalizar, es esencial incentivar la investigación y ejecución de técnicas/procesos de revalorización de residuos (no sólo los vitivinícolas). Para ello, el análisis y comparación económica entre proyectos/técnicas representa una herramienta importante para atraer la atención de académicos, empresarios y líderes políticos capaces de promover, desarrollar e implementar estrategias de economía circular.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por CONACyT a través de la beca de estancia postdoctoral de C.E. Guzmán-Martínez, así como la beca de estudios doctorales de O.D. Lara-Montaño.

Referencias

- [1] Ratna, S., Rastogi, S., & Kumar, R. (2021). Current trends for distillery wastewater management and its emerging applications for sustainable environment. *Journal of Environmental Management*, 290, 112544.
- [2] Ahmad, B., Yadav, V., Yadav, A., Rahman, M. U., Yuan, W. Z., Li, Z., & Wang, X. (2020). Integrated biorefinery approach to valorize winery waste: A review from waste to energy perspectives. *Science of the Total Environment*, 719, 137315.
- [3] Gómez-Brandón M, Aira M, Santana N, Pérez-Losada M, Domínguez J: Temporal dynamics of bacterial communities in a pilot-scale vermireactor fed with distilled grape marc. *Microorganisms* 2020, 8. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050642>.
- [4] Troncozo MI, Figoli CB, Franco MEE, Mirífico MV, Bosch A, Rajchenberg M, et al.: Biotransformation of grape pomace from *Vitis labrusca* by *Peniophora albobadia* LPSC # 285 (Basidiomycota). *An Acad Bras Cienc* 2020, 92. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181174>.



- [5] Olejar KJ, Vandermeer C, Fedrizzi B, Kilmartin PA: A horticultural medium established from the rapid removal of phytotoxins from winery grape marc. *Horticulture* 2019, 5. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040069>.
- [6] Gil-Muñoz R, Jiménez-Martínez MD, Bautista-Ortín AB, Gómez-Plaza E: Effect of the use of purified grape pomace as a fining agent on the volatile composition of monastrell wines. *Molecules* 2019, 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24132423>.
- [7] Pistol GC, Marin DE, Dragomir C, Taranu I: Synbiotic combination of prebiotic grape pomace extract and probiotic *Lactobacillus* sp. reduced important intestinal inflammatory markers and in-depth signalling mediators in lipopolysaccharide-treated Caco-2 cells. *Br J Nutr* 2019, 121:291–305. <https://doi.org/10.1017/S0007114518003410>.
- [8] Rivera K, Salas-Pérez F, Echeverría G, Urquiaga I, Dicenta S, Pérez D, et al.: Red wine grape pomace attenuates atherosclerosis and myocardial damage and increases survival in association with improved plasma antioxidant activity in a murine model of lethal ischemic heart disease. *Nutrients* 2019, 11. <https://doi.org/10.3390/nu11092135>.
- [9] Torre E, Iviglia G, Cassinelli C, Morra M, Russo N: Polyphenols from grape pomace induce osteogenic differentiation in mesenchymal stem cells. *Int J Mol Med* 2020, 45:1721–1734.
- [10] López-Fernández-Sobrino, R., Soliz-Rueda, J. R., Margalef, M., Arola-Arnal, A., Suárez, M., Bravo, F. I., & Muguerza, B. (2021). ACE Inhibitory and antihypertensive activities of wine lees and relationship among bioactivity and phenolic profile. *Nutrients*, 13(2), 679.
- [11] Fernández-Bedmar, Z., Anter, J., Alonso-Moraga, A., Delgado de la Torre, P., Luque de Castro, M. D., Millán-Ruiz, Y., ... & Guil-Luna, S. (2019). Red and White Wine Lees Show Inhibitory Effects on Liver Carcinogenesis. *Molecular nutrition & food research*, 63(9), 1800864.
- [12] Martins, I. M., Macedo, G. A., & Macedo, J. A. (2020). Biotransformed grape pomace as a potential source of anti-inflammatory polyphenolics: Effects in Caco-2 cells. *Food Bioscience*, 35, 100607.
- [13] Christofolletti, C. R., Fernandes, A. C., Gandra, R. L., Martins, I. M., Gambero, A., Macedo, G. A., & Macedo, J. A. (2022). Wine residues extracts modulating in vitro metabolic syndrome. *Food Bioscience*, 50, 101957.
- [14] Fan Q, Jiang C, Wang W, Bai L, Chen H, Yang H, et al.: Ecofriendly extraction of cellulose nanocrystals from grape pomace and construction of self-healing nanocomposite hydrogels. *Cellulose* 2020, 27:2541–2553. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-02977-2>.
- [15] Iglesias AM, Cruz JM, Moldes A, Pérez-Cid B: Efficient adsorption of lead ions onto alginate–grape marc hybrid beads: optimization and bioadsorption kinetics. *Environ Model Assess* 2020. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09692-z>.
- [16] Belayachi H, Bestani B, Benderdouche N, Belhakem M: The use of TiO₂ immobilized into grape marc-based activated carbon for RB-5 Azo dye photocatalytic degradation. *Arab J Chem* 2019, 12:3018–3027. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.040>.

-
- [17] Carbone K, Paliotta M, Micheli L, Mazzuca C, Cacciotti I, Nocente F, et al.: A completely green approach to the synthesis of dendritic silver nanostructures starting from white grape pomace as a potential nanofactory. *Arab J Chem* 2019, 12:597–609.
- [18] Varelas, V., Tataridis, P., Liouni, M., & Nerantzis, E. T. (2016). Valorization of winery spent yeast waste biomass as a new source for the production of β -glucan. *Waste and biomass valorization*, 7, 807-817.
- [19] Gowman, A., Wang, T., Rodriguez-Urbe, A., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2018). Biopoly (butylene succinate) and its composites with grape pomace: Mechanical performance and thermal properties. *ACS omega*, 3(11), 15205-15216.
- [20] Ianni A, Di Luca A, Martino C, Bennato F, Marone E, Grotta L, et al.: Dietary supplementation of dried grape pomace increases the amount of linoleic acid in beef, reduces the lipid oxidation and modifies the volatile profile. *Animals* 2019, 9. <https://doi.org/10.3390/ani9080578>.
- [21] Zhang R, Li Q, Zhang T, Qin X, Zhang J, Zhao J: Dietary grape pomace mediates jejunal epithelial apoptosis through antioxidative activity in ram lambs. *Ital J Anim Sci* 2019, 18:1058–1066. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1615850>.
- [22] Pauletto M, Elgendy R, Ianni A, Marone E, Giantin M, Grotta L, et al.: Nutrigenomic effects of long-term grape pomace supplementation in dairy cows. *Animals* 2020, 10. <https://doi.org/10.3390/ani10040714>.
- [23] Chedea VS, Palade LM, Pelmus RS, Dragomir C, Taranu I: Red grape pomace rich in polyphenols diet increases the antioxidant status in key organs— kidneys, liver, and spleen of piglets. *Animals* 2019, 9. <https://doi.org/10.3390/ani9040149>.
- [24] Câmara, J. S., Lourenço, S., Silva, C., Lopes, A., Andrade, C., & Perestrelo, R. (2020). Exploring the potential of wine industry by-products as source of additives to improve the quality of aquafeed. *Microchemical Journal*, 155, 104758.
- [25] Abdelhakam OS, Elsebaie EM, Ghazi AK, Gouda MS: Quality characteristics of beef hamburger enriched with red grape pomace powder during freezing storage. *Slovenian Vet Res* 2019, 56:333–340. <https://doi.org/10.26873/SVR-772-2019>.
- [26] Ortega-Heras M, Villarroel E, Mateos S, García-Lomillo J, Rovira J, González-Sanjosé ML: Application of a seasoning obtained from red grape pomace as a salt replacer for the elaboration of marinated chicken breasts: study of their physical-chemical and sensory properties and microbiological stability. *CYTA J Food* 2020, 18:122–131. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1709558>.
- [27] Tolve R, Pasini G, Vignale F, Favati F, Simonato B: Effect of grape pomace addition on the technological, sensory, and nutritional properties of durum wheat pasta. *Foods* 2020, 9.
- [28] Aizpurua-Olaizola, O., Ormazabal, M., Vallejo, A., Olivares, M., Navarro, P., Etxebarria, N., & Usobiaga, A. (2015). Optimization of supercritical fluid consecutive extractions of fatty acids and polyphenols from *Vitis vinifera* grape wastes. *Journal of food science*, 80(1), E101-E107.
-



- [29] da Rocha, C. B., & Noreña, C. P. Z. (2021). Microencapsulation and controlled release of bioactive compounds from grape pomace. *Drying Technology*, 39(8), 1018-1032.
- [30] Theagarajan, R., Malur Narayanaswamy, L., Dutta, S., Moses, J. A., & Chinnaswamy, A. (2019). Valorisation of grape pomace (cv. Muscat) for development of functional cookies. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 1299-1305.
- [31] Olejar KJ, Ricci A, Swift S, Zujovic Z, Gordon KC, Fedrizzi B, et al.: Characterization of an antioxidant and antimicrobial extract from cool climate, white grape marc. *Antioxidants* 2019, 8.
- [32] Papadaki A, Kachrimanidou V, Papanikolaou S, Philippoussis A, Diamantopoulou P: Upgrading grape pomace through *Pleurotus* spp. Cultivation for the production of enzymes and fruiting bodies. *Microorganisms* 2019, 7. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7070207>.
- [33] Junior, J. A., Vieira, Y. A., Cruz, I. A., da Silva Vilar, D., Aguiar, M. M., Torres, N. H., ... & Ferreira, L. F. R. (2020). Sequential degradation of raw vinasse by a laccase enzyme producing fungus *Pleurotus sajor-caju* and its ATPS purification. *Biotechnology reports*, 25, e00411.
- [34] Napolini, B.F., Machado, A.C.D.O., Junior, C., Barreiro, W., Freire, D.M.G., Cammarota, M.C., 2017. Bioconversion of sugarcane vinasse into high-added value products and energy. *Biomed Res. Int.* 2017 8986165. <https://doi.org/10.1155/2017/8986165>.
- [35] Pérez-Bibbins, B., Torrado-Agrasar, A., Pérez-Rodríguez, N., Aguilar-Uscanga, M. G., & Domínguez, J. M. (2015). Evaluation of the liquid, solid and total fractions of beer, cider and wine lees as economic nutrient for xylitol production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(6), 1027-1039.
- [36] Salgado, J. M., Abrunhosa, L., Venâncio, A., Domínguez, J. M., & Belo, I. (2016). Combined bioremediation and enzyme production by *Aspergillus* sp. in olive mill and winery wastewaters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 110, 16-23.
- [37] García-Lomillo, J., Gonzalez-SanJose, M. L., Del Pino-García, R., Rivero-Perez, M. D., & Muniz-Rodríguez, P. (2014). Antioxidant and antimicrobial properties of wine byproducts and their potential uses in the food industry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(52), 12595-12602.
- [38] Ruiz-Moreno, M. J., Raposo, R., Cayuela, J. M., Zafrilla, P., Pineiro, Z., Moreno-Rojas, J. M., ... & Cantos-Villar, E. (2015). Valorization of grape stems. *Industrial Crops and Products*, 63, 152-157.
- [39] Groff, M. C., Scaglia, G., Gaido, M., Kassuha, D., Ortiz, O. A., & Noriega, S. E. (2022). Kinetic modeling of fungal biomass growth and lactic acid production in *Rhizopus oryzae* fermentation by using grape stalk as a solid substrate. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 102255.
- [40] Mewa-Ngongang, M., Du Plessis, H. W., Ntwampe, S. K., Chidi, B. S., Hutchinson, U. F., Mekuto, L., & Jolly, N. P. (2019). Grape pomace extracts as fermentation medium for the production of potential biopreservation compounds. *Foods*, 8(2), 51.
- [41] Kopsahelis N, Dimou C, Papadaki A, Xenopoulos E, Kyraleou M, Kallithraka S, et al.: Refining of wine lees and cheese whey for the production of microbial oil, polyphenol-

-
- rich extracts and value-added co-products. *J Chem Technol Biotechnol* 2018, 93. <https://doi.org/10.1002/jctb.5348>.
- [42] Kontogiannopoulos, K. N., Patsios, S. I., Mitrouli, S. T., & Karabelas, A. J. (2017). Tartaric acid and polyphenols recovery from winery waste lees using membrane separation processes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(12), 2934-2943.
- [43] Ozdemir, I., Şahin, M., Orhan, R., & Erdem, M. (2014). Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation. *Fuel processing technology*, 125, 200-206.
- [44] Buitrón, G., Martínez-Valdez, F. J., & Ojeda, F. (2019). Biogas production from a highly organic loaded winery effluent through a two-stage process. *BioEnergy Research*, 12(3), 714-721.
- [45] Eder, A.S., Magrini, F.E., Spengler, A., da Silva, J.T., Beal, L.L., Paesi, S., 2020. Comparison of the production of hydrogen and volatile fatty acids from sugarcane vinasse by *Bacillus cereus* and *Enterococcus faecalis* strains alone, in co-cultures or in the bioaugmentation of the microbial consortium. *Environ. Technol. Inno.* 18, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100638>.
- [46] Basso, D., Patuzzi, F., Castello, D., Baratieri, M., Rada, E. C., Weiss-Hortala, E., & Fiori, L. (2016). Agro-industrial waste to solid biofuel through hydrothermal carbonization. *Waste management*, 47, 114-121.
- [47] Zhang, N., Hoadley, A., Patel, J., Lim, S., & Li, C. E. (2017). Sustainable options for the utilization of solid residues from wine production. *Waste Management*, 60, 173-183.
- [48] Lou, W., Li, B., & Nataliya, G. (2021). The influence of Cabernet Sauvignon wine grape pomace powder addition on the rheological and microstructural properties of wheat dough. *CyTA-Journal of Food*, 19(1), 751-761.
- [49] Kuchtová, V., Kohajdová, Z., Karovicova, J., & Lauková, M. (2018). Physical, textural and sensory properties of cookies incorporated with grape skin and seed preparations. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 68(4).
- [50] Pavlou, A., Melikidou, I., Petridis, D., Panayiotou, C., & Ritzoulis, C. (2021). Winery by-product hydrocolloids as texture modifiers in yogurt formulations. *Journal of Culinary Science & Technology*, 19(4), 352-371.
- [51] Spinei, M., & Oroian, M. (2021). The potential of grape pomace varieties as a dietary source of pectic substances. *Foods*, 10(4), 867.
- [52] Bender, A. B., Speroni, C. S., Salvador, P. R., Loureiro, B. B., Lovatto, N. M., Goulart, F. R., ... & Penna, N. G. (2017). Grape pomace skins and the effects of its inclusion in the technological properties of muffins. *Journal of Culinary Science & Technology*, 15(2), 143-157.
-



Políticas energéticas en Argentina. Aportes para la ejecución de proyectos de biogás

Energy policies in Argentina. Contributions for biogas projects

Caballero Sapiras, Graciela

Centro de Estudios Sociales de América Latina- Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Argentina

caballerograciela99@gmail.com

[ORCID 0000-0002-2185-8116](https://orcid.org/0000-0002-2185-8116)

Decunto, Elías Valentín

Centro de Estudios Sociales de América Latina- Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

Argentina valentindecun@gmail.com

[ORCID 000-0002-8897-2861](https://orcid.org/0000-0002-8897-2861)

Nogar, Ada Graciela

Centro de Estudios Sociales de América Latina- Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Comisión de Investigaciones Científicas. Argentina

Nogargraciela02@gmail.com

[ORCID 0000-0001-9213-6615](https://orcid.org/0000-0001-9213-6615)

Resumen

Dentro de un contexto global caracterizado por el cambio climático producto de las emisiones de gases de efecto invernadero a causa del consumo creciente de fuentes fósiles para la producción de energía, se hace presente la necesidad de una nueva transición energética que impulse el desarrollo de tecnología para la generación renovable. Este proceso involucra y ocupa a las diferentes escalas de gestión tanto a nivel de Estados Nacionales como Supranacionales. En sus respectivas órbitas de gestión política es posible identificar herramientas que acompañan el proceso de transición energética a escala local y que se corresponden con los objetivos y compromisos asumidos por la comunidad global. El presente trabajo tiene como objetivo examinar la política energética Argentina y su implementación a partir de programas de fuentes renovables hasta 2022, para identificar los impulsos hacia los proyectos de biogás que contribuyen al desarrollo de redes y territorios sostenibles, en correspondencia con los compromisos internacionales asumidos por el Estado Argentino.

Palabras clave

Cambio climático; desarrollo sostenible; bioenergía; ganado; legislación.

Abstract

Within a global context characterized by climate change because of Greenhouse Gas emissions due to the growing consumption of fossil sources for energy production, the need for a new energy transition that drives the development of technology to renewable generation. This process involves and occupies the different levels of management at the level of National and Supranational States. In their respective political management orbits, it is possible to identify tools that accompany the energy transition process at a local scale and that correspond to the objectives and commitments assumed by the global community. The objective of this paper is to examine the Argentine energy policy and its implementation from renewable sources programs until 2022, to identify the impulses towards biogas



projects that contribute to the development of networks and sustainable territories, in correspondence with the international commitments assumed by the Argentine State.

Keywords

Climate change; sustainable development; bioenergy; livestock; legislation.

Introducción

Desde mediados del s. XX la intensificación vía industrialización dispara el mercado de commodities. Los dispositivos de usos localizados trastocan los territorios desde nuevos flujos, actores e infraestructuras; en la búsqueda de productos y consumidores que justifiquen la inversión de los excedentes provenientes de la sobreacumulación. Es decir, se espacializan relaciones de poder organizadas a partir de la extracción, transformación, consumo de recursos ambientales y producción de residuos con creciente demanda de energía fósil. Así, los sistemas agroproductivos industrializados se expresan como modelos que transforman energía y otras materias primas a partir de agregados técnicos. Como lo expresa Aguado [1] la búsqueda de crecimiento y la sobreexplotación ilimitada propias del Antropoceno entra en conflicto con los límites biofísicos del planeta. El colapso ambiental resultante genera rupturas y exige reacomodaciones. El desafío es mayor en un escenario marcado por preocupaciones globales frente al cambio climático, la seguridad alimentaria, el precio de la energía y las evoluciones societales que ensayan elecciones más sustentables en los modos de vida (COP21, ODS). A su vez, la acumulación de residuos provenientes de la aceleración de procesos agroproductivos y su creciente emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) cobijan nuevas iniciativas; en las cuales el trabajo, los recursos naturales, el equilibrio ecosistémico y el reencuentro con los “lugares” traccionan la búsqueda de alternativas multidimensionales de arraigo replicables, estructuradas desde estrategias horizontales de gobernanza y gestión [2]. Frente al caos ambiental y reacomodamiento geopolítico ¿cuáles son las alternativas de los territorios?

En este marco, los proyectos que alientan el aprovechamiento de recursos renovables para sustituir fuentes fósiles en pos de la transición energética, ganan visibilidad desde una transición que pivotea desde la complementariedad entre dos modelos: generación distribuida y descentralizada. Esto involucra no sólo la localización de proyectos donde se sitúan los recursos, sino también la 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 agroindustrias o tipos de producción, lo que anteriormente era considerado “descartable” o “sin valor” se inserta en una nueva cadena de valor. En esa intersección -desechos agroindustriales/crisis ambiental- se visualiza la biomasa como fuente de energía, entendida como la parte biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura, silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales [3]. El conocimiento colectivo y la re-valorización de residuos, anclados en proyectos de generación de fuentes renovables, en hibridación con los sistemas socio-productivos, accionan la generación descentralizada [4], [5], la innovación en el uso de fuentes “bajo carbono” [6], la difusión de tecnologías menos contaminantes y la optimización de infraestructuras y servicios energéticos, claves para la transición. Así, nuevos modelos de producción y abastecimiento energético proponen soluciones adaptadas a demandas localizadas. Se trata de experiencias que expresan diferentes formas de articulación entre actores y escalas territoriales, e iniciativas que abren mayores oportunidades de desarrollo productivo, bienestar social y equidad territorial. Como lo expresa Romero [7], los precios de los productos agrícolas serán definidos por la demanda de energía y no por la de alimentos. Considerando el contexto enunciado el objetivo del trabajo es examinar la política energética en Argentina y su implementación a partir de programas de fuentes renovables hasta 2022, para identificar los impulsos a los proyectos de biogás que contribuyen al desarrollo de redes y territorios sostenibles, en correspondencia con los compromisos internacionales asumidos por Argentina (Acuerdo de París, ODS, COP26). El artículo se estructura en un apartado metodológico y en una segunda instancia se aborda la situación



de la producción de biogás a escala nacional, sus marcos normativos respaldatorios, los resultados obtenidos y estudios de caso.

Materiales y métodos

El trabajo reúne avances de investigaciones individuales y colectivas, con eje en el análisis de proyectos de bioenergía a partir de residuos pecuarios. Un abordaje metodológico cualitativo y un enfoque integral, permitieron dar cuenta de los actores, recursos y dispositivos. Las diferentes etapas de trabajo, a veces secuenciales, otras simultáneas, otras recurrentes; posibilitaron los estudios holísticos de casos. Fuentes secundarias -informes, legislación y artículos periodísticos- y datos primarios -entrevistas semiestructuradas a informantes claves (funcionarios, técnicos, residentes, referentes de organizaciones)- nutrieron los análisis. Se concretaron visitas a diferentes proyectos desde 2020, en donde se realizaron entrevistas a los responsables, como así también a población residente y funcionarios vinculados directa e indirectamente con las iniciativas. De este modo, los resultados —si bien no generalizables— posibilitaron la construcción de síntesis y de nuevas aproximaciones conceptuales.

El uso racional de la energía, la eficiencia energética y las producciones descarbonizadas son los pilares de la actual transición energética. En Argentina, si bien aún incipiente, la generación de biogás mediante la reutilización de residuos agropecuarios enuncia un horizonte favorable; debido a las condiciones biofísicas-climáticas regionales y las apropiaciones productivas asociadas.

Resultados

Mediante la utilización de fuentes secundarias se llevó adelante la recopilación de diferentes legislaciones a escala nacional, orientadas a la promoción y el desarrollo de fuentes renovables de energía. Se han identificado planes, programas y leyes desde 1985 hasta 2022 (ver cuadro 1) que evidencian, en los primeros 15 años, una preferencia hacia la

producción de energía proveniente de recurso solar y eólico y no así de la biomasa. Cabe mencionar el intento de promoción para la producción de etanol de caña de azúcar (Plan Alconafta) el cual no logró los resultados esperados. La producción de bioenergía sufrió un periodo de impasse, desde 1985 hasta el año 2001, en el cual se sancionó el Decreto 1.396/01. A partir de 2006 se observa un interés por la promoción de fuentes renovables diversificadas (Ley 26.190 y Ley 27.191) y particularmente por el biodiesel y bioetanol en el caso de la bioenergía. En relación a ésta, se destacan los programas PROBIOMASA y RenovAr, en particular la ronda 2 de este último, en la cual se adjudicaron la mayor cantidad de proyectos de biogás.

Cuadro 1. Políticas de energía renovable de la Nación Argentina.

Política Energética Nacional - Descripción	
Plan Alconafta (1985)	Fomentó la producción de etanol de caña de azúcar como combustible automotor, posteriormente se dio de baja por su costo fiscal
Programa Uso Racional de la Energía (Decreto Nacional N° 2.247) (1985-1989)	Creación y desarrollo de centros de investigación y de fuentes renovables, sustitución de combustibles derivados de petróleo por gas natural o etanol de biomasa, garantía del suministro energético, entre otras cuestiones
Decreto 1738/92, reglamentación de la Ley N° 24076 (1992)	Reguló el transporte, distribución y almacenamiento del gas (incluyendo el biogás).
Ley 25.019 de Régimen Nacional de energía eólica y solar (1998)	Determinó incentivos para el aprovechamiento de energía eólica y solar.



Programa de Energía Renovable en Mercados Rurales (1999)	Abastece de energía solar y eólica a viviendas rurales aisladas y establecimientos públicos
Plan de competitividad Biodiesel (Decreto N° 1396) (2001)	Impulsó la producción y comercialización de biodiesel (puro o mezcla)
Ley 26.093 (2006)	Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles
Ley 26.190 (2006)	Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía
Ley 26334 (2007)	Promoción de la producción de bioetanol y mezcla con nafta y gasoil con bioetanol y biodiesel en un 5%
Programa de Generación de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables (GENREN) (2009)	Impulsó la licitación y compra de 1000 MW de potencia provenientes de fuentes renovables
Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) (2012)	Fomento de la producción de energía térmica y eléctrica derivada de biomasa
Ley de Energías Renovables 27.191 (2015)	Declaró de interés nacional la generación de energía eléctrica con fuentes renovables y creación del Fondo Fiduciario (FODER) para el financiamiento de proyectos de generación renovable de energía.
Programa RenovAr (2016)	Para cumplir con la Ley 27.191, en 2016 se realizó la convocatoria Abierta Nacional e Internacional al programa destinado a proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables.

Ley 27.424 Régimen de Fomento a la Generación Distribuida (2017)	Establece el marco regulatorio para la generación distribuida de energía renovable, creación del Fondo para la Generación Distribuida de Energías Renovables (FODIS)
Clúster Renovable Nacional (2022)	Creación Organismo público-privado que tiene por objetivo articular la oferta de producción nacional para la fabricación de tecnologías renovables

Fuente: [8]

A escala provincial, se identificaron las políticas energéticas llevadas a cabo en Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, Santa Fe, La Pampa, Santiago del Estero y San Luis; con el objetivo de ejemplificar el acompañamiento de las provincias a las legislaciones nacionales que promueven la producción y consumo de energía renovable. A su vez, estas unidades de gestión territorial desarrollan actividades productivas de las cuales se deriva la biomasa empleada para producir bioenergía (particularmente biogás).

En líneas generales, las provincias adhieren a las legislaciones básicas impulsadas desde la escala nacional en materia de energías renovables; por otra parte, en algunos casos se han promulgado políticas más específicas orientadas al desarrollo de biocombustibles, como es el caso de Córdoba, provincia que cuenta con la Ley 10.721. También cabe mencionar a la provincia de La Pampa, la cual cuenta con la Ley 2.389 que declara de interés el uso del biogás.

Cuadro 2. Políticas energéticas provinciales de Argentina.

Políticas energéticas provinciales - Descripción
Provincia de Buenos Aires



Decreto 2158 (2002)	Reglamentó la Ley 12.603, sobre promoción en el uso e investigación de energías renovables
Ley 14.838 (2016)	Derogó la Ley 12.603. Adhiere al Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica, creación del Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED).
Provincia de Córdoba	
Ley 8.810 (1999)	Declara de interés provincial la generación de energía renovable
Ley 10.604 (2018)	Adhirió a la ley 27.424 e impulsó 89 instalaciones de equipos con un total de 943.10 KW de potencia de acople instalada y más de 1.600 KW de reserva
Ley 10.721 (2020)	Promovió la producción y consumo de Biocombustibles y Bioenergía mediante el aprovechamiento y transformación de la biomasa con fines energéticos
Provincia de Entre Ríos	
Ley 10.933 de Energía Eléctrica Sostenible	Adhiere a la Ley Nacional 27.424, declara de interés provincial la generación e investigación en relación a energías renovables, crea el Fondo de Energía Sostenible para financiamiento de proyectos renovables
Programa Educación Verde	Impulsar el conocimiento acerca de fuentes energéticas renovables en la población joven.
Provincia de Santa Fe	

Ley 12.962 (2008)	Definió el Régimen Promocional Provincial para la investigación, desarrollo, generación, producción y uso de productos relacionados con las energías renovables
Decreto 1556/17 (2017)	Convocó a la población a presentar políticas públicas y proyectos de energía renovable a desarrollar
Decreto 1098	Implementó el Programa Energía Renovable para el Ambiente (ERA), buscando impulsar la generación descentralizada y distribuida de energía renovable.
Programa Provincial de Uso Sustentable de Biocombustibles (2020)	Promocionó la utilización de biocombustibles principalmente en las actividades agrícolas, ganaderas, transporte y de generación eléctrica.
Provincia de La Pampa	
Ley 2389 (2007)	Declaró de interés provincial el uso de biogás, definiendo su uso, producción e implementación de políticas públicas
Ley 2918 (2016)	Adhirió a la Ley Nacional N° 27.191. Declaró de interés provincial la generación de energía eléctrica renovable y planteando el autoabastecimiento eléctrico provincial hacia 2026
Ley 3285 (2020) de “Régimen de Desarrollo Energético”	Declaró de interés estratégico provincial la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y la generación distribuida.
Provincia de Santiago del Estero	



Ley 27.424 (2021)	Adhiere a la legislación Nacional con el fin de establecer el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable.
Provincia San Luis	
Ley de Promoción y Desarrollo de Energías Renovables (2014)	Con el objetivo de propiciar la implementación de tecnologías renovables, su desarrollo, inversiones, la generación distribuida, la creación del Plan de Incentivos de Energías Renovables (P.I.E.R)

Fuente: [8]

El marco normativo nacional y provincial expuesto se materializa en parte en proyectos de producción de bioenergía; a lo largo del territorio nacional se han identificado 31 establecimientos productores de biogás (ver figura 1) a partir de residuos porcino, avícola y vacuno (la mayoría de los casos realiza codigestión con forraje y/o residuos agroindustriales).

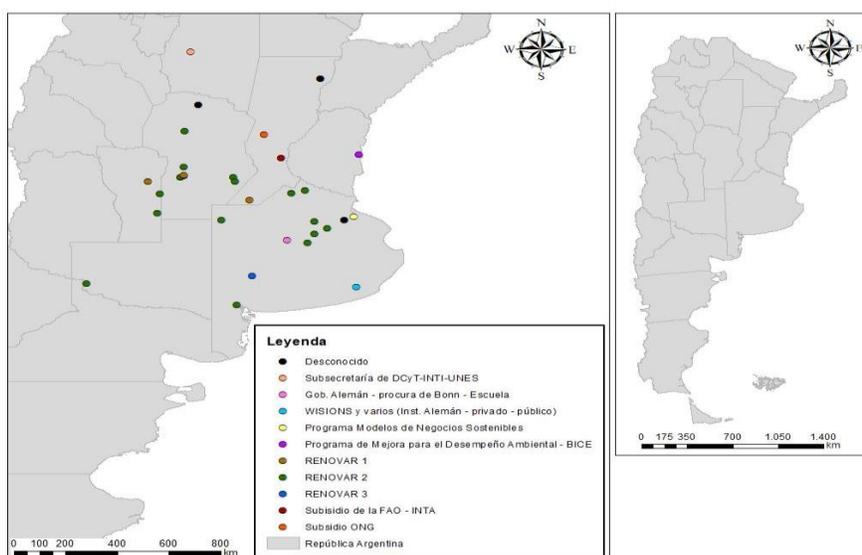


Figura 1. Proyectos de producción de Biogás en Argentina. Fuente: elaboración propia en base a [9]

En base a la información secundaria de cada uno de los proyectos identificados e información primaria, las principales barreras identificadas se deben a: la falta de legislaciones específicas, complejidad tecnológica, elevados costos para el inicio de los proyectos y su desarrollo en el tiempo, como así también en menor medida la existencia de posibilidad de riesgo de la tecnología [10]. El acceso a financiamiento y el establecimiento de contratos sostenidos en el tiempo que garantizarán la venta de la energía renovable por un periodo determinado, es lo que ha permitido la concreción de proyectos de biogás, impulsados a partir de determinadas políticas energéticas. En este sentido, puede mencionarse la Ley de Energías Renovables 27.191, a la cual han adherido algunas provincias y resulta ser el marco legislativo mayor que encierra las demás normativas, programas y decretos para el desarrollo de la energía renovable. Un ejemplo de ello es el Programa RenovAR, el cual se enmarca dentro de esta legislación mayor y ha contado con diferentes rondas de adjudicación, incorporando recursos energéticos diversos y con un amplio alcance a nivel territorial. Este Programa es el que mayor relevancia ha tenido en la concreción de proyectos de biogás a gran escala (1,5-2 MW), principalmente la Ronda 2 (ver figura 2).

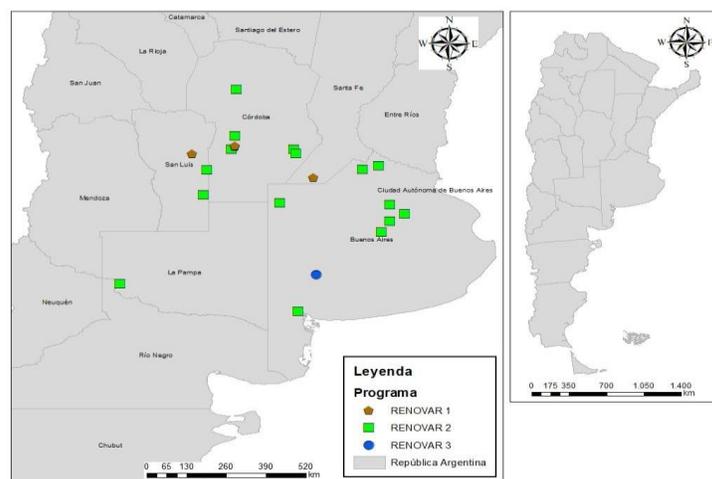


Figura 2. Proyectos de producción de biogás impulsados por el programa RenovAr Ronda 1, 2 y 3.



El Programa permitió que el Proyecto Bio Energía Yanquetruz S.A., que se encontraba en condiciones de inyectar energía a la red en 2012, pudiera hacerlo a partir de 2017, al ser adjudicado en las rondas 1 y 2. Por otra parte, posibilitó el desarrollo de la primera planta de generación eléctrica de gran escala en base a residuos orgánicos provenientes de un frigorífico vacuno, así como también la concreción del Proyecto Bio Energía Gral. Alvear, el cual había formado parte de otro programa, pero sin éxito.

Los proyectos evidencian una contribución a la generación de energía eléctrica renovable, destinada al autoconsumo y a la inyección a la red; como lo expresa Veltz [11], la proximidad característica de la escala local adquiere valor en ámbitos innovadores como la producción de energía. Además, se identifican articulaciones entre actores públicos y privados en torno a estas iniciativas. El proyecto Bio Energía Yanquetruz S.A pertenece a la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) y a Alimentos Magros S.A. y ha sido financiado con capital propio y crédito público (Banco Nación Argentina).

Otro de los ejemplos ilustrativos de la articulación entre diferentes actores es el Resener 1, el cual contó con financiamiento público y privado. Los casos enunciados se enmarcan en la búsqueda de respuestas, ¿de qué forma los proyectos de bioenergía contribuyen a la estabilidad ambiental? Los primeros resultados muestran vínculos con los ODS como, por ejemplo, acceso a la energía (Yanquetruz), creación de infraestructura resiliente, innovación para disminuir el efecto invernadero, contribución a la transición hacia territorios menos críticos (los tres proyectos). En relación con el empleo, la formalidad y permanencia caracterizan estos proyectos que demandan mano de obra local y regional. Las alianzas con cooperativas (Cooperativa de Saladillo y Asociación de Cooperativas Argentinas) junto a las universidades (UNSL y UNICen) ponderan las innovaciones y las articulaciones. Por otro lado, se valorizan los territorios, mutaciones que traspasan los límites de retorno energético, ya que se observan aportes directos e indirectos con los ODS como, por ejemplo, la producción de bioenergía a partir de residuos pecuarios, con obstáculos y restricciones coopera con la descarbonización del planeta (ODS 13). Es notorio, que los

obstáculos financieros, normativos y la discontinuidad en política energética dificultan la generación. A saber, desde la alta inversión inicial hasta el incumplimiento de los compromisos por parte de los programas, desde los retos de la importación de tecnología e innovación hasta la capacitación y desde el manejo de residuos hasta la construcción de marcos regulatorios adscriptos a nuevas alianzas territoriales.

Conclusiones y discusión

Los proyectos de biogás motivados desde la innovación sociotécnica, desafían las amenazas actuales y cooperan con los retos 2030 asumidos por los países [12]. Mediante el bagaje legislativo realizado es posible afirmar que Argentina se encuentra comprometida con los objetivos internacionales. El desarrollo e implementación de las diferentes legislaciones visualizan que aún queda camino por recorrer hacia la transición energética deseada, ya que las normativas vinculadas al aprovechamiento de la biomasa, resultan poco específicas.

Por otra parte, debemos mencionar lo que refiere a la complejidad tecnológica que no sólo se vincula con la infraestructura sino también a la falta de insumos nacionales para la concreción de los proyectos, ya que la mayoría de los materiales necesarios para la construcción son importados desde el extranjero. Para finalizar, es menester referir a la necesidad de que el marco normativo garantice y/o facilite el apoyo financiero desde el inicio del proyecto hasta su desarrollo, debido a los altos costos de inversión que requieren este tipo de iniciativas.

Los proyectos de biogás producen constantes re-acomodaciones, disrupciones y regeneraciones pues: i- rompen el desanclaje entre la producción y la demanda, ii- constituyen acciones de circularidad, reciclaje y reutilización, iii- restauran los ciclos y los procesos productivos, iv- originan contraflujos de energía y de materia, pasando de un estadio de commoditización, a instancias de agregado de valor en territorio al tiempo que



el producto final se posiciona en mercados diferenciados, v- conjugan un esfuerzo público-privado de innovación en los territorios de proximidad.

En forma simultánea los obstáculos, desafíos y tensiones dificultan la ejecución y continuidad de los proyectos: i- Por razones que van de asimetrías de información a señales de precios—aún no se internaliza la necesidad de su uso y/o consumo, ii- contradicciones inducidas desde marcos normativos ambientales y energéticos discontinuos/confusos, iii- regulaciones gubernamentales desarticuladas por tratarse de proyectos que atraviesan diferentes escalas de poder y de gestión (económica, política, ambiental), iv- obstáculos institucionales, culturales, económicos, diversidad de trayectorias, v- discontinuidad en el financiamiento de los programas, vi- dependencia de financiamiento externo, v- inversión inicial, vii- insuficientes interlocutores técnicos, viii- invisibilidad de las problemáticas ambientales en contextos de administraciones públicas frágiles, cambiantes y contradictorias. Los proyectos de biogás enunciados y en análisis, expresan valorizaciones, desajustes y necesidades transversales. La articulación y asociación de actores públicos y privados en torno a ellos resignifican los procesos de construcción territorial y permite la concreción de este tipo de proyectos. Es necesario pensar estas iniciativas en un contexto en el cual es fundamental la transición como política de Estado, reconociendo la significancia de las fuentes descarbonizadas sin descuidar el protagonismo de la demanda, es decir, el uso racional y eficiente de la energía, las necesidades de los territorios y el acceso a la energía de las poblaciones. Una transición que muestra necesidades y oportunidades, en un escenario en el cual los proyectos de biogás vectorizan la consecución de los compromisos ambientales adquiridos.

Agradecimientos

Al proyecto PICT-2017-2960 Generación distribuida en Argentina. Energías para la inclusión y la transición (Jacinto, G. Investigadora Responsable). Plan Argentina Innovadora 2020. ANPCyT Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. 2019-2022.

Referencias

- [1] Aguado, M. (2017). "Llamando a las puertas del antropoceno" *Iberoamérica Social: revista red de estudios sociales VII*, pp. 41 - 59. Recuperado en <http://iberoamericasocial.com/llamando-a-las-puertas-delantropoceno/>
- [2] Nogar, A. G., Clementi, L. V., Jacinto, G. P., & Valania, M. P. (2022). "Espacios rural-urbanos: nuevos territorios de transición energética en Argentina" *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31(1), 38-52.
- [3] Diario Oficial de la Unión Europea (2009). Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Recuperado en <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:PDF#:~:text=Cada%20Estado%20miembro%20debe%20determinar,para%20alcanzar%20sus%20objetivos%20nacionales.>
- [4] Moss, T.; Becker, S.; Naumann, M. (2014). "Whose energy transition is it, anyway? Organization and ownership of the Energiewende in villages, cities and regions". *Local Environment*, Vol. 20, Issue 12.
- [5] Alstone, P.; Gershenson, D.; Kammen, D. (2015). "Decentralized energy systems for clean electricity access". *Nature Climate Change*, Vol. 5. Pp. 305-314.
- [6] Bridge, G., & Gailing, L. (2020). "New energy spaces: Towards a geographical political economy of energy transition". *Environment and Planning A: Economy and Space*, 52(6), 1037-1050.
- [7] Romero, M. G. (2020). "Biocombustibles y producción de biohidrógeno". *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 38(8).
- [8] Ministerio de Justicia y Derechos Humanos (2022). Información legislativa y documental. Recuperado en <http://www.infoleg.gob.ar>
- [9] Chomicki, C., & Nogar, A. G. (2020). "Generación en transición. Bioenergía a partir de residuos pecuarios en Argentina". *Pampa (Santa Fe)*, (21), 27-43.
- [10] Nogar, A. G., Chomicki, C. y Berdolini, J. L. (2019). "Bioenergía a partir de residuos ganaderos. Estado de situación en provincia de Buenos Aires". *Mundo Agrario* 20 (43).
- [11] Veltz, P. (2019). "France des territoires, défis et promesses". *Editorial de l'Aube*
- [12] Nogar, A. G. (2020). "Espacios rurales en transformación desde territorios de las energías en Argentina". *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (73), 257-274.



Cuantificación del recurso biomásico derivado de la poda del olivo en dos provincias productoras de la Argentina

Quantification of the biomass resource derived from olive pruning in two producing provinces of Argentina

Martin Reynoso

Departamento Energías Renovables y Gestión Energética Región Cuyo – Subgerencia Operativa Regional CUYO - Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Argentina

mreynoso@inti.gov.ar

[0000-0001-8377-6741](tel:0000-0001-8377-6741)

Guillermo Martínez Pulido

Departamento Energías Renovables del Noroeste Argentina – Dirección Técnica Industrias Emergentes - Subgerencia Operativa Regional Noroeste Argentino – Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Argentina

gmpulido@inti.gov.ar

[0000-0002-4372-7846](tel:0000-0002-4372-7846)

Ricardo Gildeza

Departamento de Monitoreo y Control de Procesos Industriales Noroeste Argentino -
Subgerencia Operativa Regional Noroeste Argentino – Instituto Nacional de Tecnología
Industrial. Argentina

rgildeza@inti.gob.ar

[0000-0002-2280-6019](tel:0000-0002-2280-6019)

Yamile Perdiguero Samaja

Departamento Energías Renovables del Noroeste Argentina – Dirección Técnica Industrias
Emergentes - Subgerencia Operativa Regional Noroeste Argentino – Instituto Nacional de
Tecnología Industrial. Argentina

ysamaja@inti.gob.ar

[0000-0001-6116-5210](tel:0000-0001-6116-5210)

Martín Eduardo Rearte

Departamento de Energías Renovables NOA, Dirección Técnica de Industrias Emergentes
NOA, Subgerencia Operativa Regional NOA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial
(INTI). Argentina

mrearte@inti.gob.ar

[0000-0002-6876-0116](tel:0000-0002-6876-0116)

Resumen

El residuo de poda de olivares representa un pasivo ambiental importante para provincias con esta producción primaria en diferentes regiones del país, además del alto costo de disposición final que impacta en la rentabilidad del sector. La biomasa derivada de la poda de olivares, presenta un potencial energético importante y su aprovechamiento puede realizarse a través de diferentes tecnologías por ejemplo la gasificación y la producción de biocombustibles sólidos para diversas aplicaciones térmicas ya sea para uso residencial o industrial. Para optimizar la utilización del recurso biomásico dentro de un negocio más



integral, se requieren metodologías confiables y aplicables para la identificación y cuantificación de la fracción de la poda que tiene potencial energético.

El objetivo del trabajo es comparar los resultados de dos metodologías aplicadas a estudios de campo para relevar el potencial biomásico de las provincias de Catamarca y Mendoza, en ambos casos cuantificando la cantidad de poda generada, midiendo el volumen aparente de cada intervención, controlado además variables críticas para su uso y estabilidad como ser el contenido de humedad y la densidad. El resultado del análisis comparativo de ambos casos muestra valores similares entre sí y mayor a la bibliografía consultada. Las variables a tener en cuenta para desarrollar una metodología unificada son la “densidad de la plantación” y el “tipo y frecuencia de intervención”.

Palabras clave

bioenergía; cuantificación biomasa; biocombustibles solidos; poda de olivo; red de biomasa.

Abstract

The residues of olive pruning represent an important environmental liability for provinces with this primary production in different regions of the country, in addition to the high final disposal cost that impacts the profitability of the sector. The biomass derived from olive pruning groves has significant energy potential and its use can be made through different technologies, such as gasification and the production of solid biofuels for various thermal applications, whether for residential or industrial use. To optimize the use of the biomass resource within a more comprehensive business, reliable and applicable methodologies are required for the identification and quantification of fraction of the pruning that has energy potential. The objective of the work is to compare the results of two methodologies applied to field studies to reveal the biomass potential of the provinces of Catamarca and Mendoza, in both cases quantifying the amount of pruning generated, measuring the apparent volume of each intervention, also measuring variables critical to its use and stability such as moisture content and density. The result of the comparative analysis of both cases shows similar values to each other and greater than the consulted bibliography. The variables to

take into account to develop a unified methodology are the “plantation density” and the “type and frequency of intervention”.

Keywords

Bioenergy; biomass quantification; solid biofuels; olive pruning; biomass network

Introducción

La Argentina se encuentra entre los primeros productores mundiales de aceitunas en conserva aceite de oliva [1], lo que posiciona este cultivo y sus biomásas derivadas como estratégicas en el mapa de la bioenergía. El sector olivícola generó entre los años 2015-2020 en el país, un superávit comercial de USD 160 millones promedio en las exportaciones de aceitunas de mesa y aceite de oliva; y aun así con este panorama, viene registrando una fuerte tendencia descendente desde el 2008 provocados por problemas productivos y de competitividad en el mercado.

La superficie implantada del país se estima en 85.200 ha localizadas entre las regiones de Cuyo y en parte del Noroeste. Entre las provincias que conforman estas regiones, La Rioja concentra el 33,4% de la producción seguidas por Mendoza (20,5%), Catamarca (20,0%) y San Juan (17%). En conjunto, representan el 91% de la superficie. En menor medida se ubican cultivos en Córdoba, Buenos Aires, Salta, y en la región patagónica (Neuquén, Río Negro y Chubut) [2]. El costo energético para el bombeo de agua subterránea a la superficie es el que más impacta al sector olivícola, por la necesidad de riego a grandes extensiones, debido al escaso régimen de lluvias y carencia de ríos caudalosos en las zonas productivas. Según los productores, este factor alcanza un 30% del costo anual de producción.

Otro factor de importancia es el manejo y disposición final de los residuos de poda, ya que una mala gestión de estos conlleva a generar un pasivo ambiental importante y a gastos en su disposición que impactan en la rentabilidad del sector. Esta biomasa residual presenta



un potencial energético importante que puede ser aprovechado a través de diferentes tecnologías como ser la gasificación y la producción de biocombustibles sólidos según la norma ISO 17225. [3]

Para desarrollar modelos de negocios que tengan en cuenta la utilización de este residuo como un recurso biomásico, se requieren metodologías aplicables y confiables de cuantificación para poder identificar fracción de la poda que tiene potencial energético. Desde 2018 a través de la Red de Biomasa Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) [4] diferentes grupos especializados en la valorización energética de la biomasa trabajan en desarrollar este tipo de herramientas metodológicas que se transfieren al sector olivícola como parte de la oferta tecnológica del INTI. En este trabajo se comparan dos casos de medición en campo de estimación de la biomasa en las regiones productivas más importantes del sector en Catamarca y Mendoza. El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados de las metodologías aplicadas, para la cuantificación del recurso biomásico a campo, derivado de la poda de olivares de las provincias de Catamarca y Mendoza, para proyectar tecnologías de aprovechamiento aplicables en el sector olivícola en sinergia con el sector bioenergético en la Argentina y así disminuir un pasivo ambiental.

Metodologías aplicadas

El proceso de poda de los olivos, genera un residuo con un volumen elevado y heterogéneo. Esta es una problemática común en todas las fincas olivícolas de ambas regiones, incrementando las probabilidades de incendio e incurriendo en la necesidad de disponer este residuo. Cabe aclarar que, estas provincias, poseen características similares en cuanto a los factores edafoclimáticos para el cultivo. Los suelos son del rango de texturas desde franco-arenoso, franco, hasta franco-arcilloso que permiten una buena aireación y permeabilidad. El clima es exige climas templados-cálidos, con inviernos suaves y veranos largos, cálidos y secos. Prefiere temperaturas moderadas entre 10°C y 30°C capaz de soportar temperaturas del orden de los 40°C. [5]

En los años 2018 y 2021 se realizaron dos estudios de campo para relevar el potencial biomásico en las provincias de Catamarca y en Mendoza. Para comparar los resultados obtenidos se utilizará como dato bibliográfico el proporcionado por la metodología WISDOM en el informe *de “Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina”* [6]

1) Metodología aplicada en la provincia de Catamarca

Se la implementó durante un trabajo de campo en una finca olivícola de variedad Arbequina, ubicada sobre la Ruta Provincial 33. El relevamiento fue llevado a cabo por profesionales de los Departamentos de Monitoreo y Control de Procesos Industriales y de Energías Renovables del Noroeste Argentino. Los residuos de poda analizados provenían del mantenimiento que se les realizan a las plantas una vez al año para mejorar la productividad. La finca tiene un formato trapezoidal de 200 hectáreas sembradas cuyos lados más largos tienen una orientación este-oeste, cuenta con dos sectores, uno al norte y otro al sur con 567 Filas de 324m con 73 plantas a 4.50 metros de distancia de eje a eje. La poda a las plantaciones se realiza una vez al año, fila de por medio, por lo tanto, un solo espécimen de olivo es podado una vez cada dos años sabiendo esto, se pudo cuantificar en campo la cantidad de poda generada. Esta cuantificación se expresó en kilogramos (kg) por Unidad de Estudio (UE), el volumen aparente (BD) que ocupa dicha masa de poda por unidad de estudio (UE) y se tomó medida del diámetro mayor de la rama o tronco extraído de la planta producto de la poda.

2) Metodología aplicada en la provincia de Mendoza:

La Finca en la cual se implementó esta metodología, se encuentra en el distrito de Jocolí, que posee 20 hectáreas cultivadas, 11 ha de olivo (variedades Arbequina, Picual y Aloreña) y 9 ha de vid variedad Bonarda en espaldero. La productividad total declarada de la parcela



de olivo variedad Arbequina, de 3,5 hectárea y 10 a 12 años de edad, es de 60000 a 65000 kg. La poda se realizó desde los meses de junio hasta todo agosto por personal tercerizado a la empresa. La práctica comúnmente usada en esta finca es que el residuo de poda se acopia hilera por medio, y pasa un tractor para picarlo e incorporar a la tierra como materia orgánica. Los troncos más gruesos se los separa y se usan como leña por el propio personal de la finca.

3) Metodología de referencia - WISDOM:

La metodología WISDOM (Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles – Woodfuels Integrated Supply / Demand Overview Mapping), como método para visualizar espacialmente las áreas prioritarias o “puntos calientes” para los combustibles leñosos. Esta metodología se basa en el estudio de datos georreferenciados sobre aspectos socio-demográficos y de recursos naturales integrados en un sistema de información geográfica, que están presentados en un mapa ráster, esta información ofrece nuevas posibilidades de combinar o integrar información estadística y espacial sobre la producción (oferta) y el consumo (demanda) de combustibles leñosos (leña, carbón vegetal y otros dendrocombustibles). [6] No reemplaza los estudios a campo, sino que da una orientación para formular estrategias de estudios o análisis relativos a la oferta y demanda bioenergética de una región. En el caso de la biomasa por hectárea de poda de olivares, esta metodología utiliza el flujograma del proceso industrial para calcular las cantidades de poda que se obtiene, se fundamenta en la estimación de base a datos extranjeras referentes a este tipo de cultivo y a datos obtenidos por el INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo) que, para el objetivo de este trabajo, son resultados como parámetro de referencia.

A continuación, se describen los datos de contexto de cada uno de los trabajos realizados para llevar a cabo la cuantificación de la biomasa en campo para cada provincia estudiada, además se tiene en cuenta los datos proporcionados en la bibliografía.

En la provincia de Catamarca:

Una vez en la finca, se vieron residuos de poda que fueron dejados hace algunos meses atrás (mes de enero) y se realizó la cuantificación a campo de estos residuos generados. Tomando como Unidad de Estudio (UE), la distancia entre dos plantas de la misma fila (4,5 m). Esta distancia de 4,5 x 6 metros es la matriz de implantación de la finca por lo tanto es constante, el tipo de cultivo es intensivo. Los residuos se encontraban entre fila y fila acomodados en un lateral de fila apoyadas sobre el sistema de riego, a una altura de 1,30 m del nivel. Se observó que esta disposición es similar a un prisma triangular, cuyo lado más largo (distancia entre plantas) es de 4,5 metros. Sus lados 1,30 m (altura) y 1,50 m (Base).

Figura 1 de esta forma se pudo medir:

- La cantidad de poda generada y se expresó su resultado en kilogramos (kg) por unidad de estudio (UE),
- El volumen aparente que ocupa dicha masa de poda por unidad de estudio,
- Diámetro mayor de la rama o tronco extraído de la planta producto de la poda.

Con los resultados obtenidos se pudo hacer el cálculo global de la cantidad de residuo biomásico de la finca y se los expresaron en una Cuadro de Biomasa Disponible expresada en kg por Año.



Figura 1: Disposición de prisma triangular del residuo de poda

Para verificar la volumetría, se removieron las ramas, conformando un triángulo de forma piramidal como se muestra en la Figura 2. Se desagregaron los componentes de la estiba y se pesó cada uno de ellos, utilizando una balanza de mano electrónica, lo que permitió conocer el peso total de la unidad de estudio, entregándonos un resultado de 68,4 kg de Poda por UE. Además, se midió el diámetro mayor de cada componente de la estiba obteniéndose un diámetro promedio de las ramas podadas, el cual resultó de 0.57 m en promedio para la UE.



Figura 2: Disposición manual triangular de los residuos de poda

Metodología en la provincia de Mendoza:

Se tomó un sector de la parcela que se entiende como representativa de un comportamiento productivo medio (plantas de más de 5 años que ya fueron al menos una vez podadas y que ya fructificó completamente), según el criterio de los responsables del manejo operativo del cultivo en campo. La Unidad de Estudio (UE) consistió en tomar un individuo al azar, en función de una secuencia regular de selección previamente establecida (ej.: tomar un individuo de la hilera, cada 5) y realizar mediciones que se muestran en Cuadro 3. Los ejemplares ubicados en el borde de la parcela no se los tomó en cuenta porque ya se encontraban podados por la alternancia de poda en el cultivo. El esquema de implantación es de 3,5 m x 7m aproximadamente 408 plantas por hectárea. Modelo de cultivo Intensivo. Se tomó muestra del material de poda para efectuar determinaciones de humedad as (“as received” o “tal como se reciben”) en laboratorio. Dicha determinación se

efectúa en estufa de secado de convección forzada a 105 °C hasta peso constante en base a UNE CEN/TS 14774-1:2007 [7].

Resultados

Los resultados obtenidos se expresan para cada metodología.

1) Metodología 1 aplicada en la provincia de Catamarca:

Las dimensiones promedio de los acopios son las de un prisma triangular de:

- Base: 1,50 m. - Altura: 1,30 m. - Largo: 4,50 m

$$\text{Volumen} = \frac{1,5 * 1,30}{2} * 4,5 = 4,38 \text{ m}^3$$

- Ancho: 1,80 m. - Largo: 3,00 m. - Altura: 1,60 m

$$\text{Volumen} = \frac{1,80 * 3,00}{2} * 1,60 = 4,32 \text{ m}^3$$

De la disgregación y peso de cada componente (cada rama de poda) de la estiba se obtuvo un resultado de 68,4 Kg de Poda por UE. De la medición del diámetro mayor de cada rama podada se obtuvo un promedio de 0,57 m para la UE. Una vez obtenidos estos resultados, se pudo estimar la cantidad de residuo biomásico de poda de olivo disponible por año que posee la finca.

- Cálculo por volumen

$$4,32 \frac{\text{m}^3}{\text{módulo}} * 72 \frac{\text{módulo}}{\text{línea}} = 311 \text{ m}^3 / \text{línea}$$

$$311 \frac{\text{m}^3}{\text{línea}} * 2 \frac{\text{línea}}{\text{fila}} (\text{NyS}) = 622 \text{ m}^3 / \text{filas}$$

$$622 \frac{\text{m}^3}{\text{fila}} * 567 \text{ filas} = 352.674 \text{ m}^3$$

Como anualmente se poda línea de por medio se obtiene por año de Residuo de Poda

$$352.674 \frac{\text{m}^3}{2} = 176.337 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

- Cálculo por Peso



$$68,39 \frac{Kg}{módulo} * 72 \frac{módulos}{línea} = 4.924 \frac{Kg}{línea} \text{ o } 4.924 \text{ Tn/Línea}$$

$$4,9 \frac{Ton}{línea} * 2 \frac{línea}{fila} = 9,90 \text{ Tn/línea}$$

$$9,90 \frac{Tn}{fila} * 567 \text{ filas} = 5.600 \text{ Tn}$$

Como anualmente se poda línea de por medio, se obtiene la mitad de Residuos de poda de la cantidad calculada por año

$$\frac{5600}{2} \text{ Tn} = 2800 \text{ Tn/año}$$

Para realizar este análisis se tuvo en cuenta la poda relevada y caracterizada con un 16-25% de humedad determinada en laboratorio.

Cuadro 1: Disponibilidad de residuo de poda de olivo por año (Catamarca).

Biomasa	Superficie Implantada [ha]	Densidad de Plantación [Pl/ha]	Poda por Planta [kg/Pl]	Ciclo de Corta [Años]	Biomasa Disponible [kg/Año]
<i>Poda Olivo</i>	200	370	68,4	1	2.800.000

2) Metodología 2 aplicada en la provincia de Mendoza:

Los datos obtenidos muestran el peso fresco del material de poda extraído (Cuadro 3). Además, se registraron datos asociados a las condiciones de cultivo de la finca.

Cuadro 2: Mediciones de los ejemplares de olivos seleccionados

ID	Cantidad de poda	Perímetro Fuste a 10 cm del suelo	Altura inicio de copa	Altura total	Diámetro Mayor de Copa	Intensidad de poda
-----------	-----------------------------	--	--------------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	-------------------------------

	Kg	m	m	m	m	% copa extraída
1 (N-S)	36.9	0.63	0.60	4.70	5.50	30%
2(N-S)	16.6	0.54	0.62	4.45	4.80	30%
3(N-S)	23.40	0.60	0.67	4.46	4.60	35%
4(N-S)	18.65	0.58	0.57	4.26	4.78	35%
5(S-N)	20.90	0.56	0.61	4.45	3.80	25%
6(S-N)	18.65	0.52	0.55	4.38	4.25	25%
7(S-N)	32.85	0.65	0.73	4.90	5.30	35%
8(S-N)	45.30	0.61	0.74	4.70	4.65	40%
9(S-N)	42.90	0.72	1.00	5.45	4.75	35%
10(N-S)	41.30	0.71	0.76	4.90	5.00	35%
Media	30.71	0.61	0.69	4.67	4.74	33%

El porcentaje de poda extraída, depende del tipo de poda que se realice, en este caso es poda de producción o mantenimiento. El dato más importante es el cálculo de la media de poda por ha, expresada en base seca (sin humedad). Por supuesto que, en el momento de poda, el material real efectivamente tiene un alto porcentaje de humedad, por lo que el valor obtenido por muestreo y determinación analítica en laboratorio también se expresa en la Cuadro.

Cuadro 3: Datos expresados en base seca.

<i>Humedad de la poda en base húmeda (M_{ar})</i>	38.6%	% (m/m) ar
<i>Media de poda expresada en base seca, por planta</i>	18.85	Kg / Individuo
<i>Plantas por Hectárea</i>	408	Individuo/ Ha
<i>Media de poda por hectárea, expresada en base seca.</i>	7.69	t/ha

3) Metodología - WISDOM Argentina



Nos da un resultado de 2.5 t/ha al año según lo muestra el flujograma de la industria olivícola típica que se encuentra en la bibliografía. El dato obtenido de los residuos de poda frescos (húmedos) se tradujeron a biomasa seca utilizando el factor de 0,65. [8]

Comparativa de resultados

En Función a los estudios realizados, a continuación, se muestra en la Cuadro 5 los resultados comparativos de los diferentes enfoques evaluados.

Cuadro 4: Comparativa de resultados de las metodologías empleadas

Metodología	Densidad Pl/ha]	Biomasa [t/ha/año]	Observaciones. (Corrección de humedad)
<i>Catamarca</i>	370	10,63	C/ fracción fina
<i>Mendoza</i>	408	7,69	C/ fracción fina

Nota: la fracción fina la conforman ramas más pequeñas de 1 a 3 cm de diámetro

Conclusiones

Los valores obtenidos en ambas metodologías empleadas para cuantificar el residuo biomásico a campo, son mayores al valor propuesto según la metodología WISDOM de 2,5 t/ha Año. Ambas plantaciones, tienen densidades típicas del modelo de cultivo intensivo y el tipo de poda que se realizó fue de producción o mantenimiento, las variaciones en las cantidades de poda, son debidos a las mismas especies y necesidad de la planta. Del análisis comparativo de las metodologías empleadas, las variables de peso a tener en cuenta para el desarrollo a futuro de una metodología unificada de estimación de recurso biomásico a campo, son la “densidad de la plantación” y el “tipo y frecuencia de intervención” (poda de formación, mantenimiento o producción, renovación). En ambos casos se realizó una corrección de humedad “M” al valor pesado en campo, para expresarlo en peso seco. Adicionalmente otras variables de peso identificadas para la determinación de la fracción de la poda que tiene potencial energético, son la especie y la maquinaria utilizada.

Cabe destacar que las mediciones en campo de este tipo de actividades son complejas y requieren un seguimiento estrecho. Este trabajo tiene como propósito, a través del trabajo en Red, unificar criterios de asistencia técnica en una temática en auge y sumar capacidades asistencia técnica al Instituto, no obstante, se debe continuar con los estudios en campo, contrastando la gestión con los estudios analíticos de las calidades de cada sustrato bajo lineamientos de la norma ISO 17225 para continuar con las validaciones de potencial energético y para poder extrapolar a diferentes campos, regiones y cultivos.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Biocombustibles del Departamento Energías Renovables del Noroeste Argentina - INTI – Tucumán.

Referencias

- [1] Gallego, Maria Eugenia; Jury, Carlos; Del Carril, Francisco; Otero , Ramiro,, «<http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/2015/12/plan-olivicola.pdf>,» Abril 2011. [En línea]. Available: <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/2015/12/plan-olivicola.pdf>.
- [2] Carciofi, Ignacio; Guevara Lynch, Juan Ignacio; Cappelletti, Laura; Maspi, Nicole; López, Santiago,, «<https://www.argentina.gob.ar>,» Octubre 2021. [En línea]. Available: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt_15_-_economias_regionales_2.pdf.
- [3] I. O. f. Standarization., ISO 17225-1:2021 Solid biofuels Fuel specifications and classes — Part 1 Technical Committee: ISO/TC 238 Solid Biofuel, 2021.
- [4] M. E. Rearte, «Editores,» mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.editores.com.ar/revistas/ie/342/rearte_bioenergia_y_normalizacion.
- [5] Bueno, Luis A; Oviedo, Alejandro s,, «Plantacion de Olivo,» 2014. [En línea]. Available: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_manual_plantacion_olivo.pdf.
- [6] Trossero , Miguel; Drigo, Rudi; Anschau, Alicia; Carballo, Stella; Flores Marco, Noelia,, «<https://www.energia.gob.ar>,» Mayo 2009. [En línea]. Available: https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/probiomasa/WISDO_M_Arg_Informe_Final.pdf.
- [7] AENOR, «UNE-EN 14774-1 Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total.



Método de referencia,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039445>.

- [8] Escartín, Celina; Denaday, Francisco ; Parodi, Guillermo ; Paracca, Juan Ignacio ; Bonino, María Florencia ; Di Leo, Néstor ; Barasch, Yamila ;, «<http://www.probiomasa.gob.ar>,» 04 09 2017. [En línea]. Available: <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/noticia.php?id=170918110029>.

Efecto de zeolita natural sobre la producción de metano a partir de estiércol porcino

Effect of natural zeolite on methane production from pig manure

Rosa Cecilia Ruiz Bastidas

Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental, Facultad de Ciencias, Área Curricular de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

rcruizb@unal.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-1152-4040>

Luz Stella Cadavid Rodríguez

Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia.

lscadavidr@unal.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-5791-8846>



Resumen

La digestión anaerobia (DA) del estiércol porcino permite la obtención de energía renovable, biofertilizante y la disminución de los impactos ambientales asociados al manejo de este residuo. Sin embargo, la baja relación C/N del estiércol porcino genera alta concentración de nitrógeno amoniacal en el proceso de digestión reduciendo el rendimiento de metano. La zeolita es un adsorbente efectivo del amoníaco, por tal razón, en esta investigación se evaluó el efecto de zeolita natural de origen ecuatoriano sobre la producción de metano de la DA de estiércol porcino. Se evaluaron cuatro dosis de zeolita, 0.0, 1.0, 4.0 y 8.0 g/L, en biorreactores discontinuos de 1 L. La concentración de sólidos en cada uno de los reactores fue de 8 % de sólidos totales (ST) y una relación inóculo/sustrato de 1 en términos de sólidos volátiles (SV). Los resultados evidenciaron que la adición de zeolita tuvo un efecto significativo sobre la producción de metano ($p < 0.01$). Las dosis de zeolita que generaron la mayor producción de metano fueron 4.0 y 8.0 g/L con 0.335 y 0.317 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ respetivamente y los tratamientos con 1.0 y 0.0 g/L presentaron menor producción con 0.275 y 0.264 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ respetivamente ($\alpha = 0.05$). Con la adición de zeolita natural se logró un aumento significativo en la producción de metano de la DA de estiércol porcino.

Palabras clave

Adsorción; amoníaco; zeolita; metano; estiércol porcino

Abstract

Anaerobic digestion (AD) of pig manure allows obtaining renewable energy, biofertilizer and the reduction of environmental impacts associated with the management of this waste. However, the low C/N ratio of pig manure generates high concentrations of ammoniacal nitrogen in the digestion process, reducing methane yield. Zeolite is an effective ammonia adsorbent, for this reason, in this research, the effect of natural zeolite of Ecuadorian origin on methane production from AD of pig manure was evaluated. Four doses of zeolite, 0.0, 1.0, 4.0 and 8.0 g/L, were evaluated in 1 L batch bioreactors. The concentration of solids in

each of the reactors was 8% of total solids and an inoculum/substrate ratio of 1 in terms of volatile solids (VS). The results showed that the addition of zeolite had a significant effect on methane production ($p < 0.01$). The doses of zeolite that generated the highest methane production were 4.0 and 8.0 g/L with 0.335 and 0.317 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$, respectively, and the treatments with 1.0 and 0.0 g/L presented lower production with 0.275 and 0.264 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$ respectively ($\alpha = 0.05$). With the addition of natural zeolite, a significant increase in the methane yield of DA from pig manure was achieved.

Keywords

Adsorption; ammonia; zeolite; methane; pig manure

Introducción

El estiércol porcino es un material rico en proteínas, por lo que al ser tratado mediante DA se generarán altas concentraciones de nitrógeno amoniacal causando inhibición [1], [2]. Cabe aclarar que el amoníaco es un nutriente esencial para el crecimiento bacteriano [1] y que además ayuda a garantizar la capacidad buffer del medio metanogénico lo cual aumenta la estabilidad del proceso de digestión. Sin embargo, altas concentraciones de amoníaco causan inhibición de la actividad microbiana [3], debido a la inhibición directa de la actividad microbiana, los cambios en el pH intracelular, los aumentos en el requerimiento de energía de mantenimiento microbiano, el agotamiento del potasio intracelular y la inhibición de enzimas específicas [4].

La zeolita es un adsorbente efectivo del nitrógeno amoniacal, debido a que proporciona sitios de adsorción con cationes intercambiables para ion amonio y porosidad para amoníaco libre [5]. Por esto, el uso de zeolita en DA de estiércol porcino se ha evaluado para la adsorción de amoníaco y para mejorar la producción de biogás y metano, reportando ventajas tanto en la producción de biogás, mayor concentración de metano en el biogás, incremento en los porcentajes de biodegradabilidad [6], disminución en el tiempo de arranque y remoción de amonio [7]. No obstante, en algunos casos donde se ha evaluado



no ha generado incrementos en la producción de biogás he incluso se ha presentado inhibición dependiendo de la dosis utilizada.

En referencia a las dosis de zeolita utilizadas en la DA de estiércol porcino, los rangos son muy amplios. Se han reportado incrementos en la producción de metano con dosis desde 2 hasta 60 g/L [8], [7], [9], [10]. Esta variabilidad en las dosis utilizadas puede deberse a la diferencia en las características de las zeolitas de distinto origen, haciendo evidente la necesidad de evaluar el efecto de las zeolitas de manera particular. Debido a esto y a que no se encontraron reportes utilizando zeolita ecuatoriana para mejorar la DA de estiércol porcino, en esta investigación se evaluó el efecto de diferentes dosis de zeolita natural de origen ecuatoriano sobre la producción de metano a partir de estiércol porcino.

Materiales y métodos

Sustrato, inóculo y zeolita

La muestra de estiércol porcino para caracterizar y posteriormente utilizar en la investigación se tomó de una granja porcícola de ciclo completo ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Las muestras se mantuvieron a 4 °C hasta el inicio de los experimentos. El inóculo que se utilizó correspondía a inóculo granular tomado de un reactor anaerobio de flujo ascendente que trata residuos de una empresa de cárnicos el cual fue incubado durante una semana a 37 °C±1 para eliminar toda la materia orgánica fácilmente digerible antes de iniciar el experimento. El sustrato y el inóculo se caracterizaron de acuerdo con lo recomendado por [11]. Para el sustrato se determinaron ST, SV, pH y composición elemental (C, H, O, N, S) y para el inóculo ST, SV, pH, ácidos grasos volátiles (AGVs), nitrógeno amoniacal y alcalinidad (cuadro 1).

Cuadro 1. Caracterización de sustrato e inóculo

Parámetro	Sustrato	Inóculo
pH	6.85	8.00

ST (%)	26.67	8.48
SV (% ¹)	80.68	68.45
TAN (mg/L)	ND	797.72
AGVs (mg/L)	ND	822.22
Alcalinidad (mg/L)	ND	3572.50
C (% ¹)	42.72	ND
H (% ¹)	5.68	ND
O (% ¹)	29.84	ND
N (% ¹)	2.66	ND
S (% ¹)	0.34	ND

¹% en base seca

La zeolita que se utilizó en la investigación corresponde a zeolita natural comercializada en Colombia (zeolita ecuatoriana) y se adquirió con la empresa ZEOCOL S.A.S quienes comercializan zeolita de origen ecuatoriano en Colombia. La composición de la zeolita corresponde a clinoptilolita y cuarzo con porcentajes de 65.8 % y 34.2 % respectivamente. Se utilizó una granulometría mixta entre 1-3 mm, que es una de las presentaciones más comercializada en Colombia, la caracterización detallada se presenta en cuadro 2.

Cuadro 2. Caracterización de zeolita natural

Parámetro	Valor
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)	60.00
Área superficial específica (m ² /g)	67.00
SiO ₂ (% ¹)	70.00
Al (% ¹)	4.40
Fe (% ¹)	1.61
CaO (% ¹)	2.68

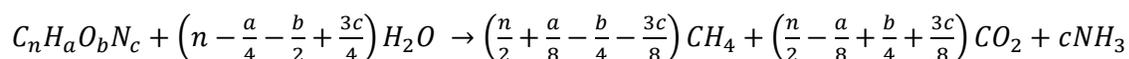


Na (% ¹)	1.40
MgO (% ¹)	0.66
K ₂ O (% ¹)	0.16
Mn (% ¹)	0.028

¹ % peso/peso

Configuración experimental

El potencial de biometano (PBM) teórico se calculó con base en la composición elemental desarrollada por [12] usando las ecuaciones 6 y 7 [13].



(6)

$$BMP_{Theoretical}(m^3CH_4kg VS^{-1}) = \frac{22.4 \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}\right)}{12n + a + 16b + 14c}$$

(7)

El factor 22.4 corresponde al volumen molar del metano (L mol⁻¹) a 273.15 K y 1 atmosfera de presión.

La prueba de producción de metano se realizó empleando procedimientos recomendados por [11]. Mediante un experimento unifactorial con esquema de aleatorización completamente al azar se evaluaron 4 dosis de zeolita 0.0, 1.0, 4.0 y 8.0 g/L. Como unidades experimentales se usaron biorreactores discontinuos de 1 L con un volumen efectivo de 700 ml. La concentración de sólidos en cada uno de los reactores fue de 8 % de ST y una relación inóculo/sustrato de 1 en términos de SV. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. Se utilizó gas nitrógeno para crear un ambiente anaerobio dentro de los biorreactores y se incubaron a 37 °C ±2 con agitación de 60 rpm. Cada biorreactor contaba con un medidor de flujo de biogás y bolsas para almacenamiento del biogás desde las cuales se midió la calidad

del biogás utilizando un analizador de biogás (BIOGAS 5000) el cuál medía el contenido de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) en % v/v; así como la concentración de nitrógeno amoniacal (NH_3) y ácido sulfhídrico (H_2S) en ppm. La prueba finalizó cuando la producción diaria de metano durante tres días consecutivos fue <1% del volumen acumulado de metano. Para analizar la estabilidad del proceso se realizó análisis inicial y final de los parámetros de control, tales como pH, nitrógeno amoniacal, alcalinidad y AGVs.

Métodos analíticos

Los análisis de caracterización de sustrato, co-sustratos e inóculo, así como los de los parámetros de control, se realizaron de acuerdo a los métodos estándar [14]. Con cada parámetro, se siguió un método particular, así: AGVs (5560 C. Método de destilación), amoníaco (4500- NH_3 E. Método titulométrico), alcalinidad (2320B. Método de titulación), pH mediante un medidor de pH inmediatamente tomada la muestra, ST (2540 B. ST secados a 103-105 °C), SV (2540 E. Sólidos fijos y volátiles incinerados a 550 °C). El análisis elemental (C, H, O, N, S) se determinó mediante la norma ASTM (5373 y 4239).

Análisis estadístico

Para probar la hipótesis de igualdad de medias de los tratamientos se empleó la prueba de análisis de varianza (ANOVA), cuando se encontraron diferencias significativas estadísticas se realizó una prueba post-anova para jerarquizar los tratamientos, las pruebas se trabajaron con un nivel de significancia de 0,05 y se usó el paquete R versión 3.6.3.

Resultados

Producción de metano

Los resultados evidenciaron que la adición de zeolita tuvo un efecto significativo sobre la producción de metano ($p < 0.01$). La diferencia en la producción de metano con las diferentes dosis de zeolita evaluadas se hizo evidente desde los primeros días y se mantuvo



hasta la finalización del experimento (figura 1). Las dosis de zeolita que generaron la mayor producción de metano fueron 4.0 y 8.0 g/L con 0.335 ± 0.002 y 0.317 ± 0.014 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ respetivamente y los tratamientos con 1.0 y 0.0 g/L presentaron menor producción con 0.275 ± 0.011 y 0.264 ± 0.001 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ respetivamente ($\alpha= 0.05$).

Con una dosis de 4.0 g/L la producción de metano se incrementó en un 27 % en comparación con la producción de los reactores sin adición de zeolita, este porcentaje de incremento es cercano al reportado por [6] quienes reportaron un incremento en la producción de metano de 29% con una dosis de 40 g/L de zeolita natural australiana.

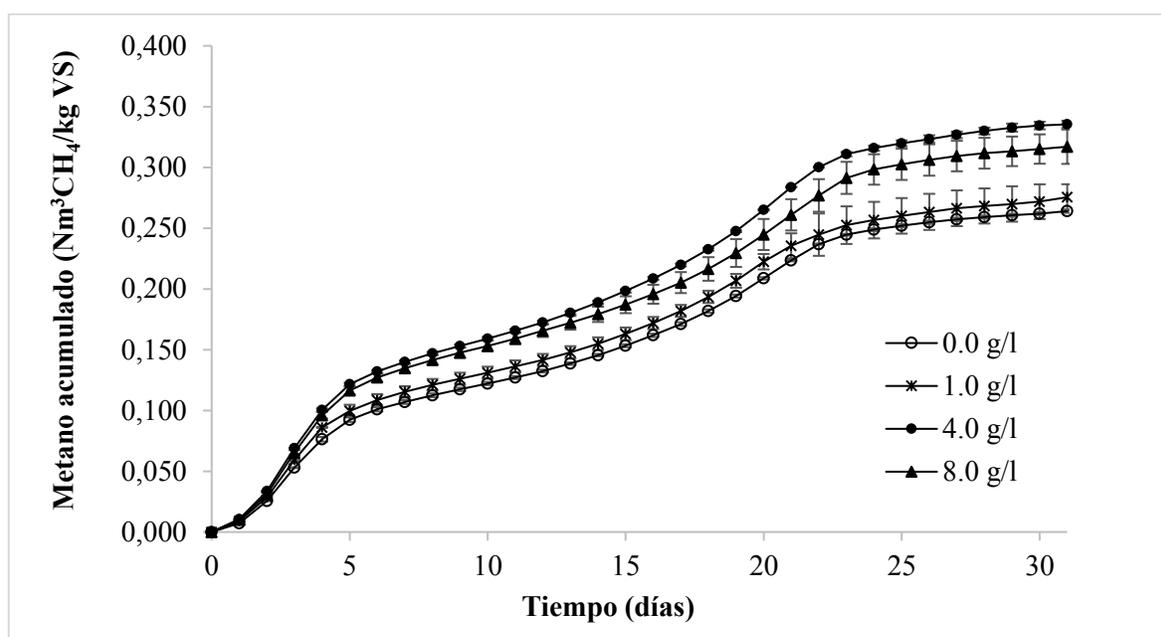


Figura 1. Producción de metano acumulado a partir de estiércol porcino con diferentes dosis de zeolita

[6], encontraron que la producción de CH_4 aumentó con dosis crecientes de zeolita natural hasta 40 g/L y disminuyó con dosis crecientes adicionales hasta 100 g/L, por el contrario, en este estudio al duplicar la dosis de 4 a 8 g/L, la mejora en la producción de metano disminuyó de 27 a 20%. Por su parte, la adición de 1 g/L no generó un incremento significativo en la producción de metano. Los resultados de esta investigación concuerdan

con lo reportado por [8], quienes encontraron incrementos en la producción de metano con dosis entre 2 y 4 g/L, cuando evaluaron dosis entre 0.2 a 10 g/L. Con las dosis de zeolita de 4.0 y 8.0 g/L se produjo el 80.24 y el 75.54% del PBM teórico y para los reactores operados con 1.0 g/L y sin adición de zeolita, solamente se logró producir el 65.90 y 63.16 % respectivamente.

Efecto de zeolita sobre las concentraciones de nitrógeno amoniacal

La dosis de zeolita no generó un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de nitrógeno amoniacal al finalizar la prueba ($p = 0.069$). Sin embargo, los menores contenidos de nitrógeno amoniacal se presentaron en los reactores con la mayor dosis de zeolita (cuadro 3). El porcentaje de reducción del contenido de nitrógeno amoniacal con respecto a los reactores sin adición de zeolita fue de 7.09, 2.87 y 2.05 % para la dosis de 8.0, 4.0 y 1.0 g/L respectivamente.

Cuadro 3. Nitrógeno amoniacal a diferentes dosis de zeolita

Dosis de zeolita	Nitrógeno amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	σ
0.0 g/L	1651.72	33.66
1.0 g/L	1617.84	38.81
4.0 g/L	1604.28	4.92
8.0 g/L	1534.68	30.89

Relación AGV/Alcalinidad y pH

La relación AGV/alcalinidad (capacidad amortiguadora) se considera un criterio de estabilidad del proceso de DA [15]–[17]. Una relación AGV/alcalinidad por debajo o alrededor de 0,4 representa un proceso estable, entre 0,4 y 0,8, ligeramente inestable, y por encima de 0,8 se considera significativamente inestable [18]. La relación AGV/Alcalinidad, al finalizar la prueba, para todas las dosis de zeolita evaluadas y para los



reactores sin adición de zeolita fue menor a 0.4, con valores de 0.17, 0.25, 0.24 y 0.23 para 0.0, 1.0, 4.0 y 8.0 g/L respectivamente. Por su parte, los valores de pH al final del experimento, para todos los reactores evaluados estaba dentro del rango recomendado para los metanógenos entre 6.5 y 7.2 [19].

Efecto de zeolita sobre la calidad del biogás

El uso de zeolita tuvo un efecto positivo sobre la producción de biogás. El biogás producido en los reactores con adición de zeolita presentó mayor contenido de CH₄, y menor contenido de H₂S. El porcentaje de metano para la dosis de 4 g/L fue mayor al compararla con las otras dosis evaluadas y con el biogás producido para los reactores sin adición de zeolita. El menor contenido de H₂S se observó desde el día quinto del experimento y al final del experimento la reducción alcanzó 53.68, 46.67 y 46.32 % para 4.0, 8.0 y 1.0 g/L respectivamente.

Conclusiones y/o recomendaciones

Con la adición de zeolita natural se logró un aumento significativo en el rendimiento de metano de la DA de estiércol porcino. Además, las ventajas de la adición de zeolita se reflejaron en una mejor calidad del biogás al incrementar los porcentajes de metano y disminuir las concentraciones de H₂S. La dosis de zeolita que representó los mejores resultados tanto en la producción de metano como en la calidad del biogás fue 4.0 g/L. Se recomienda evaluar los requerimientos de zeolita en un proceso continuo o semicontinuo que permita mantener la concentración de nitrógeno amoniacal por debajo de niveles inhibitorios y represente ventajas en la producción de metano.

Referencias

- [1] O. Yenigün and B. Demirel, "Ammonia inhibition in anaerobic digestion : A review," *Process Biochem.*, vol. 48, no. 5–6, pp. 901–911, 2013, doi: 10.1016/j.procbio.2013.04.012.
- [2] S. Astals, M. Peces, D. J. Batstone, P. D. Jensen, and S. Tait, "Characterising and

-
- modelling free ammonia and ammonium inhibition in anaerobic systems,” *Water Res.*, vol. 143, pp. 127–135, 2018, doi: 10.1016/j.watres.2018.06.021.
- [3] R. Rajagopal, D. I. Massé, and G. Singh, “A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia,” *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 632–641, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.030.
- [4] Z. Yang, W. Wang, C. Liu, R. Zhang, and G. Liu, “Mitigation of ammonia inhibition through bioaugmentation with different microorganisms during anaerobic digestion: Selection of strains and reactor performance evaluation,” *Water Res.*, vol. 155, pp. 214–224, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.02.048.
- [5] T. A. Kotsopoulos, X. Karamanlis, D. Dotas, and G. G. Martzopoulos, “The impact of different natural zeolite concentrations on the methane production in thermophilic anaerobic digestion of pig waste,” *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 105–111, 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.09.018.
- [6] D. T. N. Wijesinghe, K. B. Dassanayake, P. Scales, S. G. Sommer, and D. Chen, “Removal of excess nutrients by Australian zeolite during anaerobic digestion of swine manure,” *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 362–372, 2018, doi: 10.1080/10934529.2017.1401398.
- [7] Q. Wang *et al.*, “Study on a fixed zeolite bioreactor for anaerobic digestion of ammonium-rich swine wastes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 14, pp. 7064–7068, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.085.
- [8] Z. Milán, E. Sánchez, P. Weiland, R. Borja, A. Martín, and K. Ilangovan, “Influence of different natural zeolite concentrations on the anaerobic digestion of piggery waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 80, no. 1, pp. 37–43, 2001, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00064-5.
- [9] D. T. N. Wijesinghe, K. B. Dassanayake, P. J. Scales, S. G. Sommer, and D. Chen, “Effect of Australian zeolite on methane production and ammonium removal during anaerobic digestion of swine manure,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 1233–1241, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.01.028.
- [10] L. Lin *et al.*, “Anaerobic digestion of swine manure under natural zeolite addition: VFA evolution, cation variation, and related microbial diversity,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 97, no. 24, pp. 10575–10583, 2013, doi: 10.1007/s00253-013-5313-z.
- [11] C. Holliger *et al.*, “Towards a standardization of biomethane potential tests,” *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.336.
- [12] A. M. Buswell and H. F. Mueller, “Mechanism of Methane Fermentation,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, no. 3, pp. 550–552, 1952, doi: 10.1021/ie50507a033.
- [13] R. P. Rodrigues, D. P. Rodrigues, A. Klepacz-Smolka, R. C. Martins, and M. J. Quina, “Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates,” *Sci. Total Environ.*, vol. 649, pp. 1599–1608, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.270.
- [14] APHA. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st
-



ed. American Public Health Assosiation: American Water Works Assosiation, Water Environment Federation, Washington, D.C.

- [15] J. D. Browne, E. Allen, and J. D. Murphy, "Improving hydrolysis of food waste in a leach bed reactor," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2470–2477, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.06.025.
- [16] H. Caillet and L. Adelard, "Start - Up Strategy and Process Performance of Semi - Continuous Anaerobic Digestion of Raw Sugarcane Vinasse," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, pp. 185–198, 2021, doi: 10.1007/s12649-020-00964-z.
- [17] F. Raposo, R. Borja, M. A. Martín, A. Martín, M. A. de la Rubia, and B. Rincón, "Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation," *Chem. Eng. J.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 70–77, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.cej.2008.10.001.
- [18] M. Rasapoor, B. Young, R. Brar, A. Sarmah, W. Q. Zhuang, and S. Baroutian, "Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation," *Fuel*, vol. 261, no. Article 116497, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116497.
- [19] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens, and T. Tan, "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 383–392, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.038.

Escenarios de revalorización energética de residuos agrícolas

Agricultural residues revalorization scenarios

Rocío Eluney Guido

Instituto de Investigaciones en Físicoquímica de Córdoba (INFIQC-CONICET),
Departamento de Química Teórica y Computacional, Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

rocioeguido@unc.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0002-7698-7927>

Oscar Alejandro Oviedo

Instituto de Investigaciones en Físicoquímica de Córdoba (INFIQC-CONICET),
Departamento de Química Teórica y Computacional, Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

o.a.oviedo@unc.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0003-0738-9760>

Resumen

En el presente trabajo se presentan avances en el desarrollo y aplicación de un modelo computacional que permite analizar diversos escenarios para revalorizar Residuos Agrícolas de Cosecha, considerando aspectos técnicos y ambientales. El modelo combina información



estadística sobre cultivos, un sistema de información geográfica y algoritmos de categorización y optimización. La viabilidad técnica es demostrada en la provincia de Córdoba-Argentina, analizando la ubicación de 5 Centros de Transformación para residuos de soja y 5 para residuos de maíz. Estos 10 Centros de Transformación pueden revalorizar el 16% de los Residuos Agrícolas de Cosecha de la región. El modelo permite tener acceso a la ubicación óptima de los Centros de Transformación, las regiones más importantes para recolectar la biomasa, la cuantificar la necesidad de transporte y las distancias recorridas. La metodología es extensible a otras regiones y tipos de cultivos, siempre y cuando se disponga de datos de rendimiento de cultivos y su localización geográfica.

Palabras clave

Bioenergía; Biomasa residual; Biorrefinería; Sistema de Información Geográfica; Escenarios energéticos.

Abstract

Advances are presented in the development and application of a computational model that allows to analyze Agricultural Crop Residues revaluation scenarios, considering technical and environmental aspects. The model combines statistical information on crops, a Geographic Information System and categorization and optimization algorithms. The viability is demonstrated in the province of Córdoba-Argentina, analyzing the location of 5 Transformation Centers for soybean residues and 5 for corn residues. These 10 Transformation Centers allow the revaluation of 16% of the Agricultural Harvest Residues of the region. The model allows access to the optimal location of various Transformation Centers, the most important regions to collect biomass, transportation needs and distances traveled. It can be extended to other regions and crops types, as long as data on crop yields and their geographical location are available.

Keywords

Bioenergy; Residual Biomass; Biorefinery; Geographic Information System; Energetic Scenarios.

Introducción

Ante el actual escenario de crisis social, ambiental y climática global, se genera la necesidad imprescindible de usar fuentes alternativas y renovables de energía, para satisfacer la demanda mundial, desacoplando la generación fósil con el fin de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. La biomasa jugará un papel fundamental, ya que sus perspectivas en aumento en la producción y en el uso (especialmente bioenergía moderna) se estiman serán críticas para lograr la transición energética global en escenarios de bajas a cero emisiones netas de carbono [1]. El uso actual de biomasa para generación eléctrica, ha ido en aumento y en su mayoría está basada en pellets, biogás, residuos sólidos urbanos, y residuos agrícolas y forestales. Según el último informe de IRENA del año 2022 [1], uno de los pasos fundamentales para efectivizar el aumento de la oferta de biomasa, mediante el incremento de la productividad y un manejo sostenible, es mejorar la logística para la recolección de residuos agrícolas y forestales.

En particular, los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) son una abundante fuente de energía, con una alta dispersión y geográficamente dependientes, que pueden utilizarse para la producción de electricidad, biogás, combustibles líquidos o productos químicos [2]. Entre los principales obstáculos para la revalorización de los RAC se encuentra el volumen, almacenamiento y transporte de los recursos hacia los Centros de Transformación (CT) [3]. La herramienta idónea para trabajar con problemáticas relacionadas a la biomasa y su dispersión son los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) [2, 4-6]. Los SIGs permiten procesar gran cantidad de información georeferenciada, de forma eficiente al mismo tiempo que proceder con distintos tipos de análisis.

Diversos autores han estudiado mecanismo de aprovechamiento bioenergético de los RAC mediante el uso de SIGs, considerando incluso, distintos porcentajes de remoción, por



ejemplo, en Brasil [7-8], Bolivia [9], y en España [10]. En la referencia [7] se revaloriza la caña de azúcar, soja y maíz, concluyendo que los cuellos de botella del desarrollo de la bioenergía están relacionados con las barreras económicas, logísticas, regulatorias y políticas, y no con la falta de recursos.

Una práctica habitual es retener parte de los RAC como cobertura del suelo, con el fin de prevenir su erosión, mantener su salud y fertilidad. Es conocido que la remoción no controlada podría desencadenar en un bajo componente de carbono en la materia orgánica del suelo [11]. Es por esto que la cantidad de RAC a remover debe ser evaluada para cada región en particular para no poner en peligro la conservación del suelo y la sostenibilidad del sistema [12].

Argentina posee una extensa oferta de diversos tipos de biomasa, como se evidencia en el estudio “Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina. WISDOM Argentina” de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO (2009) [13]. La FAO también elaboró un informe particular, con la misma metodología, para la provincia de Córdoba [14], principal productor agrícola del país. En ninguno de los informes, se evaluaron, ni cuantificaron los RAC con fines energéticos, “debido a que las labranzas bajo la práctica del sistema de siembra directa, mantienen los residuos sobre el suelo para conservar su fertilidad y estructura”. Sin embargo, diferentes análisis han demostrado una enorme potencialidad de los RAC, especialmente de maíz y trigo para Córdoba y otras regiones del país [15-17]. Por ejemplo, en la Referencia [15], Menéndez y Hilbert, plantean 3 escenarios de remoción del 25, 15 y 10 %, mientras que Alvarez y colaboradores [11] recomiendan no remover más del 30% de los RAC.

Las localizaciones de los CT deben, por un lado, minimizar costos (el transporte es el principal), pero por el otro atender la posibilidad de conexión a la red eléctrica para la evacuación local de la energía, costos de inversión y mantenimiento, entre otras. Por lo tanto, para vehiculizar caminos viables de aprovechamiento de los RAC, se torna necesario

considerar análisis del tipo multicriterio. En este sentido, en la provincia de Córdoba existen 10 plantas bioeléctricas en operación, de las cuales 3 trabajan a base de biomasa (cáscara de maní) y 7 en base a biogás (digestión anaeróbica de vinaza o silaje de maíz, desechos de la actividad ganadera, residuos orgánicos agroindustriales, o residuos de granjas productoras de lácteos), generando en 2021 un total de 166 GWh/año [18].

De acuerdo a lo mencionado, la provincia de Córdoba presenta una oferta considerable de RAC [19-20], y bioplantitas en actual funcionamiento que permiten a priori asumir condiciones de rentabilidad apropiadas para su revalorización energética. Sin embargo, no hay precedentes locales de aprovechamiento energético de RAC, a pesar que autores lo mencionan como posibilidad [11,15-17]. Esto demuestra la necesidad de disponer de modelos que permitan evaluar la factibilidad local de aprovechamientos de RAC de forma sostenible. De esta forma, el objetivo del presente trabajo consiste en exponer nuestros avances en el desarrollo de un modelo para elaborar escenarios de localización de CTs para la revalorización energética de RAC.

Materiales y métodos

El presente trabajo parte de un modelo previo [19-20], al cual se le agrega un mayor menú de cultivos: maíz, maní, soja, sorgo y trigo, y se amplía la oferta de algoritmos para el análisis. Con este desarrollo el modelo es capaz de detectar la localización óptima de CT para la instalación de biorrefinerías. La metodología combina información georeferenciada de cultivos agrícolas de la provincia de Córdoba con datos estadísticos. Se utilizó el mapa de Coberturas de Suelo [21], elaborado por IDECOR, correspondiente a la campaña 2017/2018, el cual se encuentra en formato raster (mapa de píxeles), con una resolución espacial de 25 x 30 metros (200 millones de píxeles en total). Dicho mapa clasifica a la superficie de Córdoba en 27 categorías, entre las cuales se encuentran los principales



cultivos de la región. El software empleado fue QGIS [22], versión 3.16, empleando el sistema de referencia POSGAR 98/ARGENTINA, Faja 4 (EPSG: 22174).

La Figura 1 muestra un esquema del procedimiento. El modelo es construido a partir de los geodatos de cultivos, datos estadísticos de rendimiento de los mismos, sumado a otros parámetros, como humedad, factor de residuo, factor de sostenibilidad y de pérdidas (explicados párrafos debajo), todos ellos incluidos en el QGIS. Mediante una serie de geoprocursos (clasificación, clusterización, poligonización, y cálculos geométricos), se determinan los Centros de Acopio Primario (CAP). Los CAP son la unidad de análisis dentro del modelo; en ella se encuentra codificada el área del polígono, la ubicación geográfica, la masa y la cantidad de píxeles que lo constituyen. La relación entre estos CAP y una discretización espacial de la provincia de Córdoba, permite cuantificar la porción de RAC que puede ser transportable y aprovechable. El algoritmo de selección de sitios para los CT consiste en la discretización de la superficie provincial a través de una grilla cuadrada de puntos, de 10 km de espaciado. Se analiza cada punto, calculando la masa acumulada, considerando un determinado radio de recolección. La optimización involucra la selección del sitio con mayor masa de RAC acumulada, evaluando la disponibilidad del sitio (debido a zonas inapropiadas), minimizando la cercanía a las líneas de tensión eléctricas y a la red vial [23-24]. Las zonas inapropiadas se construyeron como un mapa binario excluyendo zonas en las cuales no estaría permitida la ubicación de un CT, atendiendo restricciones ambientales o de uso local de suelo. Las áreas de exclusión o inapropiadas para proponer las ubicaciones de los CT, los mapas de rutas y caminos, y los del sistema eléctrico fueron extraídos de las Referencias [25-27].

Como resultado, se obtienen la localización optimizada de los CTs o bioplantitas, la masa de Residuos Agrícolas de Cosecha, la distancia de recolección, la flota de camiones necesarios, la distancia los caminos y a las líneas de tensión. Sugerimos al lector las siguientes referencias [19-20] para obtener una mayor descripción de los algoritmos y modelos empleados en el procedimiento.

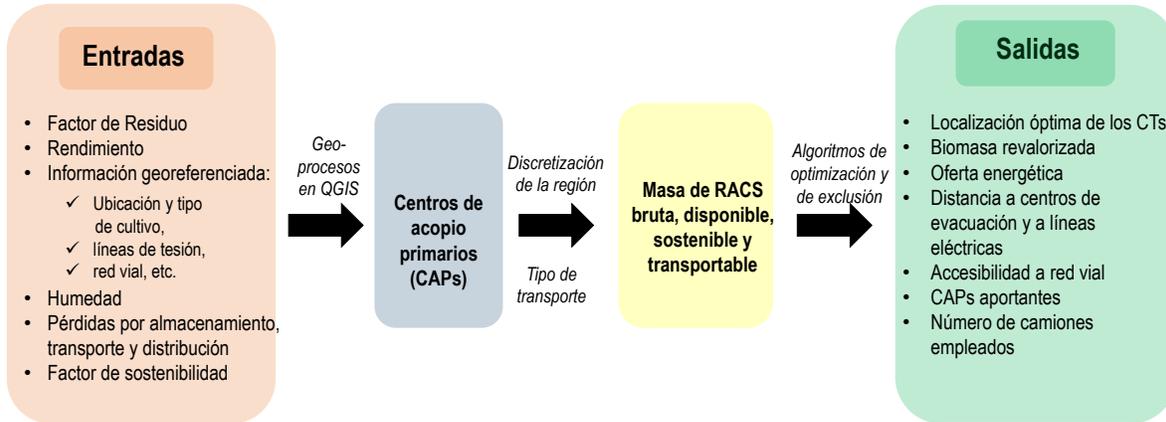


Figura 1. Esquema para visualizar las relaciones entre las variables de entrada, los algoritmos, los criterios aplicados para seleccionar la localización de los puntos de acopio, rutas de transporte y los valores de salida luego de las optimizaciones.

Finalmente vale aclarar, que se designa RAC a los Residuos Agrícolas de Cosecha brutos disponibles en la provincia. Una fracción de estos RAC, aquellos que no interfieren con la salud del suelo y la sostenibilidad del sistema siembra/cosecha a largo plazo, se denominan RAC Sostenibles (RACS). Los RACS son estimados de acuerdo a:

$$m_{kj}^{RACS} = [\delta][R_{kj}\eta_{kj}]\{FR_k[1 - (h + \gamma)]\} \left[a \sum_{i=1}^{N_j} (\sigma_{ki})_j \right]$$

Donde la masa, m_{kj}^{RACS} , es la cantidad de rastrojos sostenibles por departamento. El subíndice j representa a cada departamento, el subíndice k a cada tipo de cultivo. R_{kj} y η_{kj} son el rendimiento y relación área sembrada/cosechada de cada cultivo por departamento (extraídos de la Referencia [28]), h es el índice de humedad, FR_k el factor de residuo (en kg de residuos/kg de cosecha), δ el índice de sostenibilidad (fracción de RAC que permite no interferir con la estabilidad del suelo) y γ el factor de pérdida unificado (por cosecha, almacenamiento, transporte y distribución). a es el área de cada pixel. σ puede tomar un valor de cero o uno, dependiendo si el RAC está o no presente en el pixel i . La sumatoria se



extiende sobre el subconjunto de pixeles circunscripto al cultivo k en departamento j , indicado por N_j .

A los fines de ejemplificar la aplicación de la metodología, en este trabajo se analizan los RAC de maíz y soja. Las magnitudes de los parámetros han sido obtenidas del análisis de Bibliografía especializada [¡Error! Marcador no definido., 29-33], resumidos en el Cuadro 1

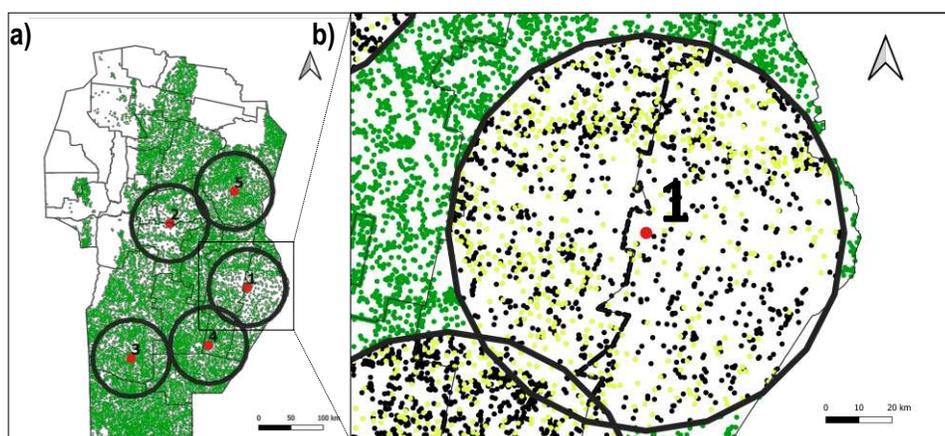
Cuadro 1. Valores de los parámetros utilizados en el modelo.

Parámetros/cultivos	Maíz	Soja
$h(\%)$	14,0	14,0
FR_k	1,0	0,6
$\delta(\%)$	25,0	25,0
$\gamma(\%)$	15,0	15,0

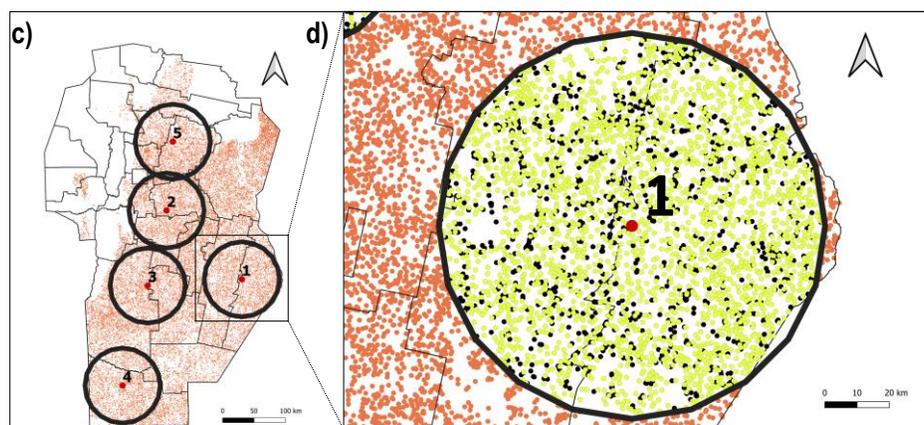
Resultados

La disponibilidad de RAC de maíz, maní, soja, sorgo y trigo es de 27,9 millones de tn/año, con una participación del 52,0%, 1,8%, 27,8%, 0,6% y 17,9% de cada tipo de cultivo, respectivamente. En lo siguiente, el análisis será centrado en los dos principales: maíz y soja. La **Figura 2** muestra la ubicación de los 5 CT con mayor masa de RACS revalorizada de soja y maíz. Cada mapa temático contiene la ubicación georreferenciada de los CAPs, junto a las circunferencias de captura (60 km). En la **Figura 2b** y **2d**, se muestra la distribución geográfica en mayor detalle del mejor CT, junto con los CAPs aportantes. Los CAP aportantes (amarillo) se relacionan con un transporte factible, mientras que lo contrario ocurre para los no aportantes (negro). Se entiende por biomasa factiblemente transportable, aquella derivada de un CAP que acumule al menos 16 tn/viaje.

Cada una de las 5 CT de soja permiten revalorizar el 2,93%, 1,65%, 1,46%, 1,25% y 1,20% de los RAC brutos disponibles en toda la provincia. Estos acumulan el 8,50% del total. Por su parte, las 5 CT de maíz revalorizan el 1,98%, 1,80%, 1,38%, 1,26% y 1,07% de los RAC brutos, acumulando el 7,50% del total de RAC de maíz provincial.



- Soja 1^{ra} y 2^{da}
- CAP Aportantes
- Centro de Transformación (CT)
- CAP No aportantes
- Circunferencia de captura



- Maíz 1^{ra} y 2^{da}
- CAP Aportantes
- Centro de Transformación (CT)
- CAP No aportantes
- Circunferencia de captura



Figura 2. Mapas temáticos mostrando los 5 CT que mayor masa de RACS acumulan: a) soja y c) maíz; con sus respectivas áreas de recolección. Se muestra en detalle la mejor región que contiene al CT = 1 para b) soja y d) maíz.

Cuadro 2. Masa de RAC, Masa de RACS, RACS total revalorizados por las 10 bioplantas y distancia recorrida de recolección de soja y maíz.

	Total, Provincia de Córdoba		Para los 10 CT optimizados	
Cultivo	RAC [tn/año]	RACS [tn/año]	RACS [tn/año]	Distancia [km/año]
Maíz	14.496.737	2.046.833	1.087.368	4.261.789
Soja	7.724.381	1.187.099	656.366	2.621.054

El proceso de optimización arrojó la mejor ubicación para soja (Figura 2b), lo cual implicará revalorizar 534 CAPs de soja (de 2.105 CAPs disponibles en la subzona), involucrando la necesidad de 11.332 viajes, con un recorrido medio de 77,8 km/viaje. En el caso del maíz, (Figura 2d) la optimización arrojó la necesidad de revalorizar 2.434 CAPs (de 3.583 disponibles en la subzona), involucrando la necesidad de 14.406 viajes, con un recorrido medio de 77,0 km/viaje. El **Cuadro 2** resume los valores obtenidos del modelo luego las optimizaciones de los 5 mejores CT para cada cultivo.

Conclusiones

La metodología presentada permite generar escenarios para localizar centros de transformación optimizados, revalorizando Residuos Agrícolas de Cosecha, teniendo en cuenta factores geoespaciales, técnicos y socio-ambientales. Se ejemplificó su viabilidad en la provincia de Córdoba-Argentina, determinando la ubicación de 10 Centros de Transformación (5 para soja y 5 para maíz), que podrían ser utilizados como sitios para la instalación de 10 biorrefinerías. Estos 10 CT permiten revalorizar el 16% de los RAC brutos de soja y maíz de la provincia de Córdoba-Argentina, sin poner en peligro la conservación del suelo y la sostenibilidad del sistema siembra/cosecha.

Agradecimientos

Se agradece al CONICET (Argentina) por el financiamiento del proyecto PIP N°11220200100725CO, a la SECyT de la Universidad Nacional de Córdoba por el financiamiento del proyecto N° 33620180101091CB. REG agradece al CONICET por su beca doctoral.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency - IRENA (2022), Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [2] A. Sultana, A. Kumar, “Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system”, Applied Energy, vol. 94, pp. 192–201, June 2012.
- T. L. Richard, “Challenges in Scaling Up Biofuels Infrastructure”, Science, vol. 329, pp. 793-796, 2010.
- [3] Perpiñá C, Alfonso D, Pérez-Navarro A, Peñalvo E, Vargas C, Cárdenas R. Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimization. Renewable Energy 2009; 34: 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.047>
- [4] Haase M, Rösch C, Ketzer D. GIS-based assessment of sustainable crop residue potentials in European regions 2016;86:156-171. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.020>
- [5] Lovrak A, Pukšec T, Duić N. A Geographical Information System (GIS) based approach for assessing the spatial distribution and seasonal variation of biogas production potential from agricultural residues and municipal biowaste. Appl Energy 2020; 267:115010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115010>
- [6] Portugal-Pereira J, Soria R, Rathmann R, Schaeffer R, Szklo A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Technoeconomic and environmental assessment in Brazil. Biomass and Bioenergy 2015;81:521-533. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>
- [7] Costa FR, Ribeiro CA, Marcatti GE, Lorenzon AS, Teixeira TR, Domingues GF, Martins de Castro NL, Rosa dos Santos A, Soares VP, Martins da Costa de Menezes SJ, Santos Mota PH, Telles LA, Romário de Carvalho J. GIS applied to location of bioenergy plants in tropical agricultural áreas. Renew Ener 2020;153:911-918. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.050>
- [8] Developing a framework to optimally locate biomass collection points to improve the biomass-based energy facilities locating procedure – A case study for Bolivia Teresa



- Moratoa , Mahdi Vaezia,b , Amit Kumara, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019.
- [9] Perpiñá C, Alfonso D, Pérez-Navarro A, Peñalvo E, Vargas C, Cárdenas R. Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimization. Renewable Energy 2009; 34: 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.047>
- [10] Alvarez R., De Paepe JL. Modelling the effects of stover harvest on soil organic carbon in the Pampas of Argentina. Soil Research 2019;57:257–265. <https://doi.org/10.1071/SR18262>
- [11] Sahoo K, Mani S, Das L, Bettinger P. GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants. Biomass and Bioenergy 2018;110:63–74. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.006>
- [12] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2009). Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina. WISDOM Argentina. Análisis espacial de la producción y consumo de biocombustibles aplicando la metodología de “Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles” (Wood fuel Integrated Supply / Demand Overview Mapping).
- [13] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Ministerio de Energía y Minería, y Ministerio de Agroindustria de la Nación. (2017). Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa. Metodología WISDOM. Provincia de Córdoba. Colección de documentos técnicos N° 5.
- [14] Menéndez JE, Hilbert JA. [Crop residues biomass quantification and bioenergy use in Argentina]. Bioenerg Technical reports. INTA - National Institute of Agricultural Technology Editions year 2 N°4;2013. ISSN 2250-8481.
- [15] Acevedo A. y Cruzate G. (2018). Biorremediación de los recursos naturales. 1a ed. - Buenos Aires: Ediciones INTA, 2018, Capitulo 15, Residuos de cosecha con fines bioenergéticos: el rastrojo de maíz. p. 312-326.
- [16] Roberts JJ, Marotta Cassula A, Prado PO, Dias RA, Perrella Balestieri JA. Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 41: 568-583.
- [17] CAMMESA. Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista. [Monthly Synthesis. Demand Base Monthly Report 2021-12]. Spanish. Available from: <https://cammesaweb.cammesa.com/informe-sintesis-mensual/>
- [18] R. E. Guido, V. M. Javi, C. R. Rodríguez y O. A. Oviedo. “Mapeo de la Potencialidad Bioenergética de Residuos Agrícolas de Cosecha en la Provincia de Córdoba-Argentina”. Energías Renovables y Medio Ambiente, en prensa, diciembre 2021.
- [19] R. E. Guido, V. M. Javi, C. R. Rodríguez y O. A. Oviedo. “Modelo para la localización de bio-refinerías a base de residuos agrícolas de cosecha en la provincia de Córdoba-Argentina”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 25, pp. 175-186, 2021.
- [20] García CL, Piumetto M, Teich I, Morales H, Kindgard A, Fuentes ML, Bosio MJ, Ravelo A. Mapas de cobertura de suelo de la provincia de Córdoba 2017/2018; 2019.

-
- [21] QGIS. <https://www.qgis.org/es/site/>
- [22] IDECOR. Córdoba Maps Geoportal, Infraestructura de Datos Espaciales de la provincia de Córdoba. [Internet]. Descargas [visitado 2020: May 20]. Disponible en: <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>
- [23] Secretaría de energía de Argentina. Disponible en: <http://datos.energia.gob.ar/>
- [24] Capas SIG. Instituto Geográfico Nacional – IGN. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- [25] Capas temáticas con información de la Provincia de Córdoba. Secretaría de Industria. Ministerio de Industria, Comercio y Minería de la Provincia de Córdoba. 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu/?page_id=77
- [26] Datos Energía. Secretaría de Energía. Ministerio de Desarrollo Productivo. Gobierno de la República Argentina. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia>
- [27] Estadísticas de cultivos por campaña. Bolsa de Cereales de Córdoba - BCCBA. 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.bccba.org.ar>
- [28] Sultana A, Kumar A, Harfield D. Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology* 2010;101:5609–5621. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.011>
- [29] Rivetti AR. [Maize production under different complementary irrigation regimes in Río Cuarto. Córdoba, Argentina. II. Yield of dry matter]. *Rev. FCA UNCuyo*. 2007;1:29-39. Spanish.
- [30] Haro R, Casini C, Rainero H, Salas P, Lovera E, Peiretti J. [Effect of direct sowing of peanuts on the production and quality of grain suitable for human food within a soybean and corn zero tillage system]; 2003. Spanish. Available from: <http://ciacabrera.com.ar/docs/JORNADA%2018/1-HARO.pdf>
- [31] Vega CRC, Sadras VO, Andrade FH, Uhart SA. Reproductive Allometry in Soybean, Maize and Sunflower”. *Annals of Botany* 2000;85:461-468. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1084>
- [32] INTA. National Institute of Agricultural Technology. [Corn cultivation in San Luis]. San Luis: INTA editions; Technical information 188. 2015. ISSN 0327-425X. Spanish. Available from: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_maizensanluis.pdf
-



Palabras finales

Hemos llegado al final de un largo recorrido, cristalizando con esta publicación otro gran esfuerzo de la Red ReBiBiR (T).

Con gran alegría compartimos este compendio de Trabajos Seleccionados que muestran ideas estratégicas y proyectos clave en la búsqueda de promover la llamada “bioeconomía” sostenible. Esta bioeconomía podría constituir un nuevo modelo de abordaje a nivel territorial para el desarrollo armónico de las regiones. Sin embargo, requiere para su correcta implementación y la verificación de su validez, de una base de aplicaciones prácticas probadas y aprobadas por nuestras comunidades.

El grupo de profesionales e investigadores que han compartido en este compendio sus trabajos, sin duda han aportado en dicha dirección. En muchos casos, constituyen solo pequeños gérmenes de grandes desarrollos por venir, ya que cada tema requiere años de estudio, investigación, trabajo duro y esfuerzo mancomunado para dar frutos cada vez más abundantes y tangibles. En otros casos, se trata de esfuerzos ya cristalizados en productos de conocimiento o desarrollo puestos a disposición de la Región.

Nuestra Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural está orgullosa de cada uno de sus miembros, que han extendido ramificaciones en cada país a lo largo de todos estos años de trabajo. Gracias a todos los colegas y entusiastas que se fueron sumando a medida que avanzaba nuestro caminar. Gracias a todos. Por su incansable trabajo, su cálido compromiso y aportes de excelencia. Muchas gracias.

Hasta siempre.

Los Editores

Sobre el Equipo Editor

Prof. Dr. QUELBIS QUINTERO BERTEL – Universidad de Sucre, Colombia

Doctor en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, área conversión energética. Líder del grupo de investigación Bioindustrias. Categorizado como Investigador Asociado por el Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación de Colombia. Investigador en sistemas agroenergéticos sostenibles, biocombustibles, biorrefinería de residuos sólidos urbanos, agrícolas y agroindustriales, y fijación de carbono en los suelos mediante aplicación de biochar. Asesor y consultor en el área agroambiental, tanto en el sector privado como público a nivel Nacional e Internacional. Profesor universitario a nivel de pregrado y posgrado, en el área agrícola, ambiental y energética. Ha dirigido proyectos de investigación, autor de artículos y capítulos de libros en sus áreas de investigación.

Prof. Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO- Universidad Autónoma de Querétaro, México.

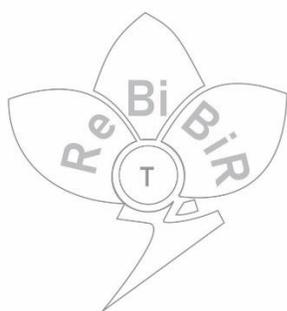
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química (Instituto Tecnológico de Celaya, México). Profesor-Investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Investigadora Nacional Nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadores (CONACYT-México). Lidera el grupo de investigación Procesos Sustentables de Producción de Bioenergéticos, que se enfoca en el diseño de procesos de producción considerando aspectos ambientales, sociales, económicos, de seguridad, así como de cadena de suministro.

Prof. Dra. SILVINA M. MANRIQUE- Universidad De Alcalá, Madrid, España// Universidad Nacional de Salta, Argentina.

Doctora en Ciencias en Energías Renovables, área biomasa y bioenergía. Profesor-Investigador en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alcalá (España) y Miembro de Carrera del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) en INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional). Asesora y consultora en el área ambiental, tanto en el sector privado como público a nivel nacional e Internacional. Lidera áreas de gestión sostenible de recursos, bioeconomía circular y proyectos energético-ambientales. Coordinadora de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), del Programa CYTED.

Contacto: redrebibir@gmail.com





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.cytmed.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

Instagram: red-rebibir

Descargo de responsabilidad: Las opiniones, conceptos, resultados, tablas, gráficas, ilustraciones y fotografías, que hacen parte de cada uno de los trabajos compartidos, son responsabilidad exclusiva de los autores mencionados en los mismos.