



ESTUDIO DE RESIDUOS BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS PARA LA INSTALACIÓN DE UNA BIOREFINERÍA DE PEQUEÑA ESCALA

STUDY OF AGRICULTURAL BIOMASS WASTE FOR THE INSTALLATION OF A SMALL-SCALE BIOREFINERY

Josseline Mishell Solís Bermúdez^{ID}, Gabriela Alexandra Zambrano Varela^{ID},
Ramón Eudoro Cevallos Cedeño^{ID} y María Antonieta Riera*^{ID}

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí. Código Postal 130103, Portoviejo, Ecuador.
[<https://ror.org/02qgahb88>]

*Autor para correspondencia: maria.riera@utm.edu.ec

Manuscrito recibido el 29 de septiembre de 2021. Aceptado, tras revisión el 05 de julio 2022.

Resumen

En los últimos años se ha considerado el uso de residuos lignocelulosos para la producción de distintos bioproductos. Entre los países con este potencial está el Ecuador, el cual tiene una economía agraria, generadora de residuos que constituyen en su mayoría biomasa lignocelulósica. La provincia de Manabí ubicada en la costa ecuatoriana es una zona agrícola cuyos residuos son por lo general quemados, dejados en el campo o usados para alimentación animal. Atendiendo a esta premisa, se desarrolló un análisis multicriterios a través del proceso de jerarquía analítica (AHP), en el cual se evaluaron 6 biomásas agrícolas: cascarilla de café, cáscara y mucílago de cacao, olote de maíz, cáscara de plátano y bagazo de caña de azúcar. Los mismos fueron ponderados por un panel de expertos en función a su potencial energético, composición, rendimiento de biomasa, costo de procesamiento e impacto ambiental. Para ello se consultó bibliográficamente la composición de los residuos (análisis proximal y elemental), así como las tecnologías actuales de procesamiento. A partir del AHP se conoció que la biomasa agrícola con mayor potencial de ser utilizado en una biorrefinería de pequeña escala es el bagazo de caña de azúcar (33,20%), seguido de la cascarilla de café (26,10%), siendo la caña de azúcar reconocida con mayor riqueza en polisacáridos y una fuente prometedora para la obtención de biocombustibles y otros productos químicos. Se espera que los resultados obtenidos sean de fundamento para otras investigaciones y de interés para el desarrollo bioeconómico del país.

Palabras clave: Biomasa, biorrefinería, Ecuador, biomasa, proceso de jerarquía analítica, residuos agrarios.

Abstract

In recent years, lignocellulose residues have been used for producing different bioproducts. Among the countries with this potential is Ecuador, which is characterized by having an agrarian economy, generating waste that constitutes mostly biomass of the lignocellulosic type. The province of Manabí, located on the Ecuadorian coast, is an

agricultural area whose residues are usually burned, left in the field or used for animal feed. Based on this premise, a multicriteria analysis was developed through the Analytical Hierarchy Process (AHP), in which 6 agricultural biomasses from the Ecuadorian coast were evaluated: coffee husks, cocoa husks and mucilage, corn cob, banana peels and sugar cane bagasse. They were evaluated by a panel of experts based on their energy potential, biomass composition, yield, processing cost and environmental impact. The composition of the waste (proximal and elemental analysis) was bibliographically consulted, as well as current processing technologies. From the AHP, it was known that the agricultural biomass with the greatest potential to be used in a small-scale biorefinery is sugarcane bagasse (33.20%), followed by coffee husks (26.10%), being the recognized sugarcane with the greatest richness in polysaccharides and a promising source for obtaining biofuels and other chemical products. It is expected that the results obtained in this study will be the basis for other research and will be interesting for the bioeconomic development of the country.

Keywords: Biomass, biorefinery, Ecuador, biomass, analytical hierarchy process, agricultural wastes.

Forma sugerida de citar: Solís Bermúdez, J.M., Zambrano Varela, G.A., Cevallos Cedeño, R.E. y Riera, M.A. (2025). Estudio de residuos biomásicos agrícolas para la instalación de una biorefinería de pequeña escala. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. [Acceso Temprano] <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.09>.

IDs Orcid:

Josseline Mishell Solís Bermúdez: <https://orcid.org/0000-0002-0637-4228>
Gabriela Alexandra Zambrano Varela: <https://orcid.org/0000-0002-7656-3817>
Ramón Eudoro Cevallos Cedeño: <https://orcid.org/0000-0002-8583-4674>
María Antonieta Riera: <https://orcid.org/0000-0002-7195-2821>

1 Introducción

La economía mundial está basada en la comercialización de productos y en la dependencia de recursos no renovables como el petróleo (Navarrete Loza and Saavedra Cuadrado, 2014). Aunque este ha sido el modelo principal de negocios, en la actualidad y en concordancia con las metas fijadas en los objetivos y metas de Desarrollo Sostenible 2030, muchos países están sumando esfuerzos para pasar de una economía tradicional a una bioeconomía. La bioeconomía se define como el uso de recursos (biomasa), procesos y principios biológicos innovadores para la obtención de bienes y servicios de manera sostenible (Birner, 2018). La biomasa se concibe como material de origen biológico, proveniente de organismos vivos o que alguna vez vivieron, excepto los incrustados en formaciones geológicas o fosilizados (Birner, 2018). La biomasa potencialmente utilizable como materia prima en las biorrefinerías (complejo industrial donde se lleva a cabo su procesamiento), puede ser de diversos tipos: agrícola, forestal, residuos orgánicos domésticos, microalgas, entre otros (Hernández Benítez and Céspedes Rangel, 2019).

El término biorrefinería nace en los noventa en base al concepto de Chemurgy, como un intento de producir una variedad de productos biobasados utilizando biomasa agrícola como materia prima (Pazmiñón Sánchez et al., 2017). El Laboratorio Nacional Estadounidense de Energía Renovable (NREL), destaca que las biorrefinerías son instalaciones que integran procesos y equipos de conversión de biomasa para producir una variedad de productos: combustibles, energía y químicos (Redondo-Gómez et al., 2020). Las mismas están destinadas a valorizar una diversa gama de materias primas renovables como la biomasa proveniente de la silvicultura, la acuicultura y residuos agrarios, entre los cuales se encuentran los de origen agrícola o ganadero (Katakojwala and Mohan, 2021).

Las biorrefinerías de primer nivel ubicadas en países desarrollados como Bélgica, Holanda, Francia, Austria y Alemania reportan el uso de almidón o forraje provenientes del trigo y el maíz, las cuales son materias primas de consumo humano para la producción comercial de bioetanol (Gutiérrez Villanueva et al., 2020). También están los residuos agrícolas, como el bagazo, la paja de arroz y el ras-

trojo de maíz, que se utilizan como materias primas en la industria de pulpa y papel (Mongkhonsiri et al., 2018). Algunos países, como Brasil, emplean la biomasa de caña de azúcar para la producción de biocombustibles (Pazmiñón Sánchez et al., 2017). A nivel global, en algunas investigaciones se observa la utilización de distintos residuos agrícolas como la paja de arroz, cáscara y el rastrojo del maíz, rastrojo o residuos de piña para producir bioetanol (Kumar et al., 2018; Kazemi Shariat Panahi et al., 2020; Chintagunta et al., 2017), así como también la cáscara de naranja para obtener bioplásticos (Gutiérrez Villanueva et al., 2020).

Estas biomasa agrícolas son residuos lignocelulósicos y además de ser un sustrato renovable en comparación con los combustibles fósiles están compuestas principalmente por tres constituyentes: celulosa, hemicelulosa y lignina (Sharma and Saini, 2020). La celulosa es el material polimérico orgánico más común y disponible en el mundo. Se usa frecuentemente para producir materiales de cartón, papel, y también como precursor del bioetanol de segunda generación (Yousuf et al., 2020; Korányi et al., 2020). La hemicelulosa es un heteropolisacárido amorfo, ramificado, compuesto por azúcares de cinco y seis carbonos. La presencia de azúcares reductores en la hemicelulosa es importante como fuente clave para la producción de sustancias químicas (Lorenci Woiciechowski et al., 2020; Mankar et al., 2021).

La lignina es otro componente importante de la biomasa lignocelulósica, y es un biopolímero aromático complejo con alto contenido de carbono. En el procesamiento de biomasa, la lignina es el componente infrautilizado, aunque tiene un enorme potencial como materia prima para las industrias química y de combustibles (Mathew et al., 2018; Korányi et al., 2020). Debido a su composición, los residuos lignocelulósicos tienen la capacidad de ser utilizados en la obtención de bioproductos de alto valor agregado, como ácido láctico, furfural, ácido levulínico, entre otros. (Espinoza-Vázquez et al., 2020).

El interés por el uso de residuos lignocelulósicos y especialmente los de origen agrícola radica en que son materias primas de bajo costo con una gran cantidad de compuestos para su aplicación en biorrefinerías lignocelulosas. Algunas investi-

gaciones reportan que en algunas biorrefinerías a pequeña escala se han utilizado residuos agrícolas para la producción de biogás, xilano, glucosa, etanol y polihidroxialcanoatos (Parralejo et al., 2019; Dos Santos et al., 2017; Clauser et al., 2018).

En países como el Ecuador, la biomasa es abundante por ser un país megadiverso, con actividad agrícola extensa. El año 2020 registró unos 5,20 millones de hectáreas en tierras cultivadas, siendo los principales cultivos la caña de azúcar, el banano y la palma africana (INEC, 2020). Manabí conforma una de las provincias del país con mayor número de actividades económicas relacionadas a la agricultura, con 1,2 millones de hectáreas de labor agrícola, que representan el 15,83% del territorio a nivel nacional. Asimismo, existen pequeños centros de procesamiento agroindustrial, entre las que se encuentran las productoras de snack, harina de plátano, procesadoras de arroz y maíz, además de las industrias de caña de azúcar y café, responsables de la producción de panela, aguardiente, café tostado y molido, respectivamente (Manabí Produce, 2021; MANABÍ PRODUCE-EP, 2016).

Esta actividad agrícola y agroindustrial genera residuos caracterizados por ser recursos potencialmente renovables, sustentables, rentables y económicos para la producción de bioenergía (Gupta and Verma, 2015). Es por ello que los subproductos agrícolas, pecuarios y residuales urbanos pueden ser aprovechados en una biorrefinería a pequeña escala (Gómez-Soto et al., 2019). Las biorrefinerías, al basarse en el uso de biomasa residual, contribuyen con la disminución de los costos energéticos y la emisión de gases con efecto invernadero, a la vez que generan energía, materiales y productos químicos (Carmona-Cabello et al., 2018).

Para la fecha en la que se realizó la investigación, además de los centrales azucareros, sólo hay registro de una biorrefinería en el país, específicamente en el campus de Nayón de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Esta instalación se encuentra actualmente en operación, y desarrolla productos como etanol, biogás, biofertilizante, combustible, alimentos para animales, además de otros compuestos químicos de alto valor (Carvajal, 2013; Cevallos, 2018). En la provincia de Manabí no se registra la existencia de un complejo industrial de este tipo, pese a que genera residuos de la

actividad agrícola que realiza (Sumba et al., 2019). La implementación de una biorrefinería a pequeña escala en Manabí daría mayor valor a la actividad agrícola por aprovechamiento de residuos, que en la actualidad están ocasionando un efecto negativo al medio ambiente.

El uso de residuos de origen agrícola como materias primas es una elección prometedora para ofrecer coste añadido y afectar de manera positiva tanto a la economía como al ambiente de la provincia. Una decisión de este tipo requiere el análisis multicriterio, con el fin de evaluar las diversas alternativas y seleccionar la mejor. Existen diversas herramientas que se utilizan para apoyar la toma de decisiones, entre las cuales se encuentra el proceso de jerarquía analítica (AHP).

El AHP se destaca dentro de los métodos de evaluación integral en fuentes renovables de energía, dando a conocer las bases para obtener una correcta elección, valorando el potencial de aprovechamiento de la biomasa desde una perspectiva multicriterio (Jiménez Borges et al., 2019). Actualmente, la selección de biomasa por el método AHP se ha puesto a prueba en varios estudios como la evaluación de sostenibilidad de las principales biomasa en la provincia de Cienfuegos, Cuba, donde el bagazo fue el de mayor contribución energética (Jiménez Borges et al., 2019). Otra aplicación para este método ocurrió en la determinación sistemática del mejor residuo agrícola para la producción de polihidroxialcanoatos (Requiso et al., 2018). Dentro de este contexto, resulta novedoso aplicar el método de AHP para evaluar el uso de subproductos agrícolas en una zona específica del Ecuador, con el fin de ser utilizados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sobre las biomasa agrícolas generadas en la provincia de Manabí, con el propósito de aplicar un proceso de jerarquía analítica que permita seleccionar los de mayor utilidad para que sean usados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala. El correcto análisis, además de los resultados obtenidos, servirán como un framework para el desarrollo de la bioeconomía en el país.

2 Materiales y Métodos

2.1 Método de análisis multicriterios

Para seleccionar aquellos subproductos con mayor índice de importancia, se utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica, que es un método de análisis de decisión desarrollado por Tomas Saaty en 1980, diseñado con el fin de beneficiar la toma de decisiones y proveer un enfoque estructurado para determinar los pesos y ponderaciones de los múltiples criterios y los estandariza para que puedan compararse (Ramírez et al., 2020). La aplicación del método de AHP considera los siguientes pasos (Huamaní Huamaní and Eyzaguirre Tejada, 2015):

- Seleccionar la meta: Consiste en definir el objetivo a alcanzar, para lo cual es necesario disponer de información y experiencia de un experto sobre el tema, para seleccionar criterios y proponer alternativas.
- Establecer la estructura jerárquica: Una vez definida la meta global, criterios y alternativas de solución se propone el modelo Jerárquico.
- Proponer matrices a partir de comparaciones y una escala numérica que corresponde a expresiones verbales comúnmente usadas (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty. Tomado de Saaty (2014).

Escala numérica	Escala verbal
1	Igual importancia.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.
Incrementos 0, 1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un grado alto de precisión).

El proceso iterativo se repitió para cada criterio, hasta obtener los resultados que fueron finalmente sometidos a una medida de consistencia. El tamaño de consistencia, λ_{max} se dedujo como un valor propio primordial con base a la técnica del vector propio. Esto se hace calculando la capacidad de multiplicación de la matriz de las calificaciones de los criterios (en la fila de la matriz de comparación por pares) y el promedio normalizado de todos los componentes (dentro de la columna de la matriz normalizada) dividido por el promedio normalizado del criterio (Owolabi et al., 2020). Posteriormente se calcula el Índice de Consistencia (CI) (Luna et al.,

2019), a través de la ecuación 1.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (1)$$

Donde n es el tamaño de la matriz y λ_{max} es el máximo valor. Luego mediante la ecuación 2 se calcula una relación de consistencia (RC), que compara el índice de consistencia (IC) de la matriz con los juicios obtenidos, versus el índice de consistencia (RI) de una matriz aleatoria (Tabla 2).

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Tabla 2. Índice de consistencia. Tomado de Qazi et al. (2018).

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Si el resultado de RC es superior a 0,10 indica que los juicios de la matriz son inconsistentes, y no son aceptables para tomar decisiones. Para valores de RC equivalentes o menores a 0,10, las consistencias son aceptables, válidas y justificadas para la toma de elecciones.

2.2 Alternativas de selección

Las alternativas de selección representaron cada uno de los subproductos agrarios considerados en el estudio, los cuales fueron considerados en base a la información reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2020), sobre las actividades agrícolas que aportaron mayor producción en el año 2020 para la provincia de Manabí, Ecuador.

En este sentido, se trabajó con los residuos provenientes del café (cascarilla), cacao (cáscara y mucílago), maíz (olote), plátano (cáscara) y caña de azúcar (bagazo), cuyos constituyentes representan ser una fuente prometedora de material lignoceluloso. Adicionalmente, se consultó bibliográficamente el contenido proximal (% de humedad, sólidos volátiles, cenizas y carbono fijo) y elemental (Carbono, Nitrógeno, Hidrógeno, Oxígeno y Azufre) de los diferentes residuos evaluados. Del mismo modo, se consideraron los procesos actualmente aplicados para la biomasa, así como también los distintos productos que se pueden obtener a partir de ellos.

2.3 Selección de criterios para la valoración de las alternativas

El uso de biomasa residual agrícola tiene el potencial de convertirse en gas de síntesis para generar energía o una serie de productos químicos básicos o plataformas, que parte de compuestos como lo son la celulosa, hemicelulosa, almidón, lignina, lípidos, y proteínas.

La conversión de biomasa en productos químicos ofrece diversas oportunidades pero plantea nuevos desafíos tecnológicos, debido a que su compleja estructura requiere tratamientos de conversión para descomponer el material en monosacáridos y generar productos de valor agregado (Kover et al., 2021).

En base a estos señalamientos y teniendo en cuenta lo expuesto en investigaciones previas relacionadas al tema en estudio, se establecieron 5 criterios de selección.

- **Potencial energético:** La biomasa es un recurso energético renovable que no solo aporta energía limpia, sino que también asegura que las fuentes de energía estarán disponibles para las generaciones futuras, siempre que se utilicen de manera sostenible (Morato et al., 2019). Este criterio hace referencia al potencial que tiene el residual para convertirse en energía.
- **Composición:** La composición química de la biomasa lignocelulósica determina su potencial como materia prima de biorrefinería. Siendo la celulosa, hemicelulosa, lignina, contenido proximal y elemental (Jaffar et al., 2020).
- **Rendimiento de biomasa:** Se refiere a la cantidad cosechable de biomasa durante la producción de un determinado cultivo (Cobuloglu and Büyüktaktakin, 2015).
- **Costo de procesamiento:** Mide el costo de transformación de la biomasa en una forma de producto o energía utilizable. La biomasa puede procesarse de distintas maneras según el uso final y los productos requeridos, utilizando tecnologías de conversión químicas, térmicas, termoquímicas y bioquímicas (Shahbaz et al., 2020).
- **Impacto ambiental:** La biomasa agrícola se ha considerado un producto potencial para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos negativos en el medio ambiente (Fantini, 2017). Este criterio evalúa la reducción del impacto ambiental, con la selección de uno de los residuos.

La cantidad de biomasa disponible depende de la producción de cada rubro, así como de la estacionalidad de cada cultivo; sin embargo, estos aspectos no fueron incluidos como criterios de selección, debido a que el interés de la investigación se orientó a evaluar el potencial que tienen los residuos generados en la unidad de estudio para ser utilizados en procesos de biorrefinación en la producción de distintos bioproductos.

2.4 Panel de expertos

Para determinar el peso de los criterios seleccionados, se buscó la opinión de un panel de expertos conformado por 14 profesionales, relacionados directamente con el tema estudiado. Se recomienda que el grupo esté conformado entre 7 y 15 participantes para mantener un nivel de confianza y calificación elevado (Gómez Montoya et al., 2008).

Asimismo, se contó con un formulario de Google estructurado en base al método AHP, en el cual cada uno de los expertos expresó su opinión sobre los subproductos agrarios en función de los criterios de selección establecidos para ser utilizados como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala. Una vez que el panel de expertos ponderó los criterios de selección, se llegó a un consenso para la aplicación del AHP.

2.5 Herramientas informáticas utilizadas

Se empleó el software Super Decisions V3.2., una herramienta gratuita de uso educativo desarrollada por Saaty para Procesos de Red Analítica (ANP) y Procesos de Jerarquía Analítica (AHP).

3 Resultados y Discusión

A partir de la bibliografía consultada se conoció la composición lignocelulósica, así como el contenido proximal y elemental (Tabla 3) de los residuos evaluados, los cuales pueden utilizarse como materia prima en la producción de textiles, empaques, esteroides, pulpa de papel, material de construcción, abonos y alimentos. Los materiales lignocelulósicos tienen aplicación en productos de consumo animal y humano. Investigaciones previas han demostrado su uso para la obtención de alcohol, xilosa, xilitol y xilo-oli-gosacaridos (Muñoz-Muñoz et al., 2014).

Los métodos de análisis proximal y elemental (Tabla 3) muestran potencial para reflejar el contenido de energía química de la biomasa, permitiendo la evaluación de la sostenibilidad de las biorrefinerías que coproducen bioaceite, biocarbón, biodiésel, glicerol y bioelectricidad (Aghbashlo et al., 2020).

El análisis elemental o análisis final estima las posibles emisiones de gases contaminantes producidos durante la combustión (Rojas et al., 2018). Por lo general, la biomasa contiene entre 70 % y 86 % de materia volátil y un bajo contenido de carbón, lo que hace que la biomasa sea un combustible altamente reactivo. Los combustibles con pocos sólidos volátiles pueden provocar combustión sin llama, mientras que un alto contenido de sólidos volátiles puede encenderse fácilmente (Akowuah et al., 2012; Yang et al., 2017). Un mayor contenido de materia volátil en la producción de bioaceite implica una mayor cantidad (Cai et al., 2017). Asimismo, cuanto mayor sea el contenido de carbono fijo, mayor será su temperatura durante el proceso de conversión de energía, ya que este es el combustible que realmente está presente en la biomasa (Palacios Vallejos et al., 2020).

La ceniza de la biomasa puede usarse como fertilizante. Sin embargo, los elementos de las cenizas también pueden causar problemas durante la combustión. Un alto contenido de cenizas conlleva a reducir la eficiencia del proceso, por lo que se prefiere una biomasa con un bajo contenido de cenizas como fuente de combustible (Yang et al., 2017; Zajac et al., 2018). La determinación del nivel de humedad es importante porque los altos niveles de humedad pueden causar problemas en la caldera durante los procesos de combustión, mientras que los niveles bajos de humedad pueden acelerar la combustión (Ku Ahmad et al., 2018).

Otro aspecto a considerar es el método de procesamiento por el cual se transforman los residuos. La biomasa es una materia prima compleja, por lo tanto, su conversión a producto final requiere de procesos que se pueden clasificar en cuatro tratamientos principales: físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos para mejorar la accesibilidad a sus biopolímeros en el procesamiento industrial (Orejuela-Escobar et al., 2021; Moreno et al., 2019).

La trituración mecánica y la extrusión son métodos de pretratamiento físico prometedor para la conversión de biomasa (Moreno et al., 2019), y son responsables de la reducción del tamaño de las partículas y aumentan el área superficial de los materiales lignocelulósicos (Kumari and Singh, 2018).

Tabla 3. Composición lignocelulósica, proximal y elemental de los residuos analizados

Biomasa	Cel (%)	Lig (%)	Hemic (%)	Hum (%)	SV (%)	CF (%)	Cn (%)	C (%)	N (%)	H (%)	O (%)	S (%)	Referencias
Cascarilla de café	24,50	23,70	29,70	11,30	72,94	7,76	8,00	39,68	3,01	5,41	51,58	0,32	(Murthy and Madhava Naidu, 2012; Zinla et al., 2021)
Cáscara de cacao	30	35	10	10,91	61,17	19,78	8,14	41,59	1,67	6,18	45,98	0,10	(Martínez-Ángel et al., 2015; Tsai et al., 2020)
Mucílago de cacao	41,68	6,05	21,14	84,71	ND	ND	0,37	66,41	3,44	6,35	18,1	0,05	(Widjaja et al., 2021; Saavedra-Sanabria et al., 2021; González Cabra and Suarez Muñoz, 2018)
Olote de maíz	50	15,80	33,80	10,20	56,77	41,86	1,37	45,69	5,65	6,18	41,65	0,04	(Montiel and Romero, 2015; Kluska et al., 2020)
Cáscara de plátano	13	14	14,80	11,56	88,02	2,70	9,28	35,65	1,94	6,19	45,94	20,75	(Kumar et al., 2016; Kabenge et al., 2018)
Bagazo de caña de azúcar	42,19	21,56	20,60	5,92	81,55	10,91	1,62	45,5	0,80	5,63	48,07	0,21	(Álvarez, 2016; Adeniyi et al., 2019; Zamora Rueda et al., 2015)

Cel: Celulosa, Lig: Lignina, Hemic: Hemicelulosa, Hum: Humedad, SV: Sólidos volátiles, CF: Carbono fijo, Cn: Cenizas, ND: No Determinado

El tratamiento químico es uno de los métodos más prometedores para mejorar la biodegradabilidad de la celulosa mediante la eliminación de lignina y hemicelulosas (Behera et al., 2014). Este a su vez puede clasificarse en alcalino, ácido, con sulfito, organosolv e iónico (Oh et al., 2015).

Estos métodos químicos en la industria del papel se han utilizado para la deslignificación, el cual tiene como objetivo eliminar las fracciones no celulósicas a partir de un tratamiento alcalino (Michelin et al., 2020). La conversión fisicoquímica incluye métodos que combinan cambios físicos y reacciones químicas durante el procesamiento, siendo el pretratamiento fisicoquímico de la biomasa con explosión de vapor uno de los más utilizados. Los procesos de conversión de este tipo conducen a la producción de biocombustibles de alta densidad (Jędrzejczyk et al., 2019).

Los tratamientos biológicos utilizan enzimas u organismos para hidrolizar la celulosa y la hemicelulosa y fermentar las moléculas de azúcar (Kumari and Singh, 2018). El propósito es producir biocombustibles, así como diferentes tipos de productos químicos como biogás, hidrógeno, etanol, butanol,

acetona, etc. Comúnmente se prefiere la biomasa con un alto porcentaje de materia orgánica biodegradable y alto contenido de humedad. Los procesos más utilizados de este tipo son la digestión anaeróbica y la fermentación (Zinla et al., 2021; Garba, 2020).

El procesamiento a escala industrial de la biomasa se realiza con una combinación de los procesos descritos, en función del diseño del sistema de producción y de los productos que se esperan obtener. Atendiendo a lo descrito y con el propósito de seleccionar el subproducto agrícola con mayor importancia para su aprovechamiento en la instalación de una biorrefinería, se aplicó el proceso de jerarquía analítica. Para ello, se comenzó con la elaboración de una estructura jerárquica multinivel que relaciona los criterios y alternativas de selección (Figura 1). Las matrices normalizadas para cada criterio de selección se obtuvieron con la ponderación dada por el panel de expertos (Ver Anexos).

Posteriormente, se obtuvo la matriz normalizada de los criterios seleccionados (Tabla 4), la prioridad de las alternativas (Tabla 5) y la razón de consistencia de cada criterio (Tabla 6).

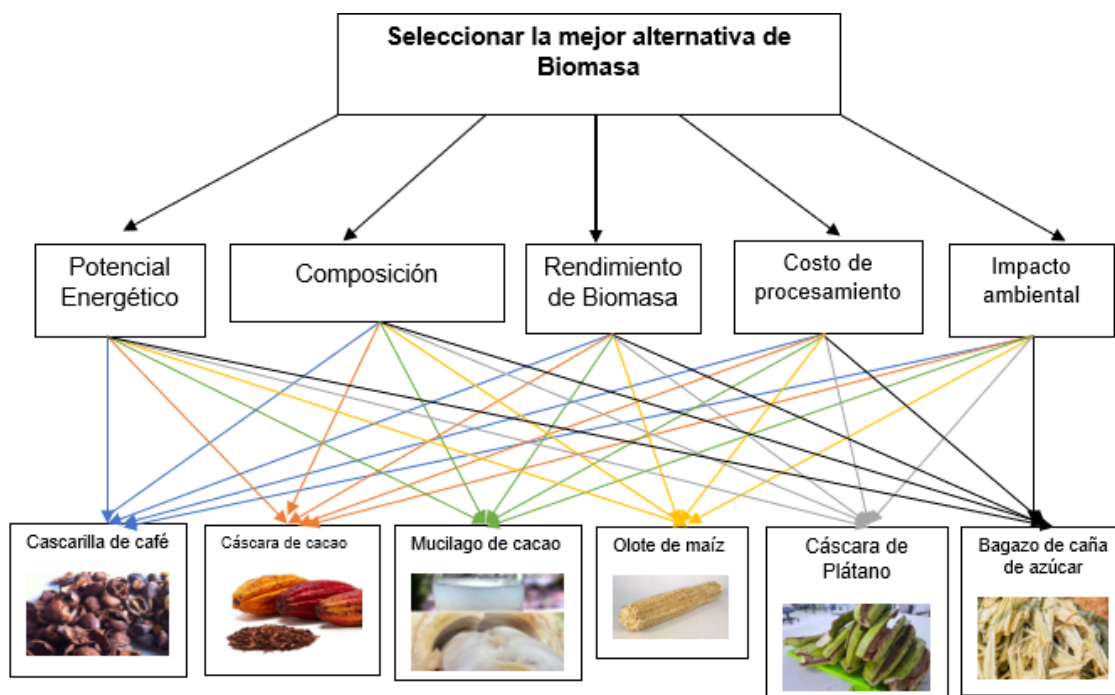


Figura 1. Estructura jerárquica de la selección de los subproductos agrarios de la provincia de Manabí.

Los resultados obtenidos indican que entre los subproductos evaluados, el mejor fue el bagazo de caña de azúcar con un vector de prioridad del 33,20%, seguido de la cascarilla de café con un 26,10%, siendo estas dos biomásas las que mejor se desempeñan como materia prima en una biorrefinería de pequeña escala dentro del contexto analizado. En cuanto a los criterios evaluados, la composición y el impacto ambiental predominan sobre el resto, infiriendo la posibilidad de emplear residuos con contenido lignocelulósico como lo es la caña de azúcar.

En una investigación similar, se evaluó la sostenibilidad de distintas biomásas (residuos agrícolas de cosecha y forestales), a través de herramientas de economía ecológica, entre las que se incluyó el AHP. Los resultados obtenidos con el análisis multicriterios arrojaron que el bagazo de caña de azúcar (Jiménez et al., 2020), con un vector de prioridad de 0,57, es el de mayor contribución energética. En términos de energía, el bagazo de caña de azúcar representa una de las fuentes más grandes de bioenergía (Amezcuza-Allieri et al., 2019). Los resultados obtenidos tienen un índice de consistencia igual o menor a 0,10, lo que significa que las consistencias fueron aceptables y válidas para la toma de decisiones.

Las principales razones para tener preferencia relativamente más alta por el bagazo de caña de azúcar se debe a que es un residuo agrícola rico en polisacáridos, convirtiéndose en una materia prima prometedora para la obtención de biocombustibles y otros químicos, bajo un concepto de biorrefinería. La gestión adecuada de los recursos de este desperdicio crea así una oportunidad para generar ingresos adicionales (Konde et al., 2021; Restrepo-Serna et al., 2018).

El bagazo de caña de azúcar en procesos biotecnológicos puede utilizarse como fuente de carbono para producir etanol de segunda generación, xilitol, biogás, además de productos plataforma como la glucosa y la xilosa, de los cuales pueden obtenerse otros de alto valor (Antunes et al., 2021; Nosrati-pour et al., 2018). En los últimos años, el ácido succínico, sustancia química de valor agregado, puede derivarse del bagazo de caña de azúcar y se ha investigado como coproducto para las biorrefinerías (Nieder-Heitmann et al., 2019). Asimismo, este residual puede utilizarse en procesos de fermentación para obtener compuestos como butanol, ácido láctico y poli-3-hidroxibutirato (PHB), siendo estos identificados para incluirlos en la gama de biorrefinerías multiproducto (Restrepo-Serna et al., 2018).

Tabla 4. Matriz normalizada de los criterios seleccionados

Criterio	PE	C	RB	CP	IA	Normal	Ideal
PE	1	0,33	0,2	1	0,33	0,074	0,221
C	3	1	3	5	1	0,334	1
RB	5	0,33	1	5	0,33	0,202	0,606
CP	1	0,2	0,2	1	0,2	0,057	0,171
IA	3	1	3	5	1	0,334	1

PE: Potencial energético, C: Composición, RB: Rendimiento de la biomasa, CP: Costo de procesamiento, IA: Impacto ambiental

Tabla 5. Prioridad de alternativas

Gráfico	Alternativas	Total	Normal	Ideal	Clasificación
	1 Cascarilla de café	0,131	0,261	0,787	2
	2 Cáscara de cacao	0,103	0,205	0,618	3
	3 Mucílago de cacao	0,021	0,042	0,125	5
	4 Olote de maíz	0,021	0,041	0,125	6
	5 Cáscara de plátano	0,059	0,118	0,355	4
	6 Bagazo de caña de azúcar	0,166	0,332	1	1

En segundo lugar, se encuentra la cascarilla de café, cuyo interés surge debido a su alto valor potencial. Debido a su composición rica en polisacáridos, junto con un número significativo de otras biomoléculas activas, es posible obtener productos de valor agregado a partir de esta biomasa (Oliveira et al., 2021; Mora-Villalobos et al., 2021).

Tabla 6. Razón de consistencia obtenida en los criterios.

Matriz	RC
Potencial energético	0,103
Composición	0,096
Rendimiento de biomasa	0,099
Costo de procesamiento	0,088
Impacto ambiental	0,093

A partir de la cascarilla de café se puede obtener bioproductos que incluyen ácido cítrico, ácido láctico, polihidroxialcanoatos, biocombustible, cosméticos, entre otros (Aristizábal-Marulanda et al., 2017; Iriondo-DeHond et al., 2020). Por otro lado, también se ha propuesto la cascarilla de café para su uso como relleno en matrices poliméricas por ser una alternativa potencial de bajo costo. Asimismo, destacando su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y alto poder calorífico, es una materia prima prometedora para producir bioenergía (Rambo et al., 2015; Sisti et al., 2021).

4 Conclusiones

La aplicación de un proceso de jerarquía analítica permitió identificar la mejor opción de biomasa para ser utilizada como materia prima en una biorrefinería a pequeña escala, en la provincia de Manabí. Los criterios con mayor importancia en la evaluación fueron la composición de la materia prima y el impacto ambiental, los cuales recibieron igual peso global entre todos los evaluados. Mediante el análisis multicriterios, se determinó que el bagazo de caña de azúcar es la alternativa más prometedora respecto al resto de las biomásas estudiadas. De este modo, este residual agrícola representa una alternativa de interés para el progreso bioeconómico del país, puesto que genera oportunidades para el desarrollo de nuevos productos y con ello de participación en el mercado global. Los residuos lignocelulósicos son fuentes renovables, y su composición

y propiedades estructurales tienen efectos significativos en su conversión dentro de una perspectiva de procesamiento de biorrefinería. El conocimiento de la composición en los residuos permite predecir el tipo de tratamiento a aplicar para obtener una amplia gama de bioproductos.

Contribución de los autores

J.M.S.B.: Investigación, metodología, escritura- borrador original, visualización. G.A.Z.V.: Investigación, metodología, escritura- borrador original, visualización. R.E.C.C.: Validación. M.A.R.: Conceptualización, supervisión, validación, escritura- revisión y edición.

Referencias

- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., and Abdulsalam, A. (2019). Modeling of integrated processes for the recovery of the energetic content of sugar cane bagasse. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4):1057–1067. Online:https://n9.cl/9u5n2.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nadian, M. H., Soltanian, S., Ghasemkhani, H., Shafizadeh, A., and Lam, S. S. (2020). Determining biomass chemical exergy using a novel hybrid intelligent approach to promote biomass-based biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, 277:124089. Online:https://n9.cl/w57br.
- Akowuah, J. O., Kemausuor, F., and Mitchual, S. J. (2012). Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(20):1–6. Online:https://n9.cl/ujwo6h.
- Amezcuza-Allieri, M. A., Martínez-Hernández, E., Anaya-Reza, O., Melgarejo-Flores, L. A., Palmerín-Ruiz, M. E., Eguía-Lis, J. A. Z., Rosas-Molina, A., Enríquez-Poy, M., and Aburto, J. (2019). Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 118:281–292. Online:https://n9.cl/xdnad.
- Antunes, F. A. F., Thomé, L. C., Santos, J. C., Ingle, A. P., Costa, C. B., Dos Anjos, V., Bell, M. J. V.,

- Rosa, C. A., and Da Silva, S. S. (2021). Multi-scale study of the integrated use of the carbohydrate fractions of sugarcane bagasse for ethanol and xylitol production. *Renewable Energy*, 163:1343–1355. Online:https://n9.cl/g6pau.
- Aristizábal-Marulanda, V., Chacón-Perez, Y., and Cardona Alzate, C. A. (2017). Chapter 3 - the biorefinery concept for the industrial valorization of coffee processing by-products. In *Handbook of Coffee Processing By-Products: Sustainable Applications*, volume 10, pages 63–92. Online:https://n9.cl/m78f6.
- Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., and Kumar, S. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36:91–106. Online:https://n9.cl/clkwh.
- Birner, R. (2018). *Bioeconomy concepts*, pages 17–38. Online:https://n9.cl/wjd4pa. Springer.
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., and Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:309–322. Online:https://n9.cl/homjx.
- Carmona-Cabello, M., Garcia, I. L., Leiva-Candia, D., and Dorado, M. P. (2018). Valorization of food waste based on its composition through the concept of biorefinery. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14:67–79. Online:https://n9.cl/lm2f3d.
- Carvajal, J. (2013). Centro neotropical para investigación de la biomasa, centro neotropical para investigación de la biomasa. CNIB. Online:https://n9.cl/womvc.
- Cevallos, A. (2018). La puce desarrolla desinfectantes, agua pura y refrescante en su biorrefinería en el campus de nayón para ayuda a los damnificados -sede ibarra, pontificia universidad católica del ecuador. PUCE.
- Chintagunta, A. D., Ray, S., and Banerjee, R. (2017). An integrated bioprocess for bioethanol and biomanure production from pineapple leaf waste. *Journal of Cleaner Production*, 165:1508–1516. Online:https://n9.cl/siu9n.
- Clauser, N. M., Gutiérrez, S., Area, M. C., Felissia, F. E., and Vallejos, M. E. (2018). Alternatives of small-scale biorefineries for the integrated production of xylitol from sugarcane bagasse. *Journal of Renewable Materials*, 6(2):139–151. Online:https://n9.cl/xuxgzw.
- Cobuloglu, H. I. and Büyüктаhtakin, I. E. (2015). A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection. *Expert Systems with Applications*, 42(15-16):6065–6074. Online:https://n9.cl/fo88hd.
- Dos Santos, A. M., Dos Santos, A. M., Zepka, L. Q., and Jacob-Lopes, E. (2017). Downstream recovery of microalgal bioproducts with highlights on biorefineries. *Biorefineries: Concepts, Advancements and Research*, pages 1–38. Online:https://n9.cl/feh0go.
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F. I., and Ponce-Ortega, J. M. (2020). Supply chain optimization for the production of biofuels and bioproducts from lignocellulosic biomass in Mexico. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48:1339–1344. Online:https://n9.cl/1kkxw.
- Fantini, M. (2017). *Biomass Availability, Potential and Characteristics*, volume 57, pages 21–54. Online:https://n9.cl/zk0fm. Springer.
- Garba, A. (2020). *Biomass Conversion Technologies for Bioenergy Generation: An Introduction, Biotechnological Applications of Biomass*. IntechOpen. Online:https://n9.cl/rj9gr.
- Gómez Montoya, D., Méndez Giraldo, G. A., Méndez Morales, E., Ortiz Chavarro, G., and Turriago Hoyos, I. (2008). Metodología basada en proceso de jerarquía analítica (ahp) para seleccionar cadenas productivas que buscan soluciones de automatización a bajo costo. *Ingeniería (Bogotá)*, 13(1):15–26. Online:https://n9.cl/2kqx2.
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, J., and Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53):7–32. Online:https://n9.cl/2iis7.
- González Cabra, A. J. and Suarez Muñoz, F. (2018). Potencial de producción de biometano y biohidrógeno a partir de residuos agrícolas: mucílago de café y cacao y estiércol de cerdo.

- Gupta, A. and Verma, J. P. (2015). Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy*, 41:550–567. Online:https://n9.cl/5qhty.
- Gutiérrez Villanueva, A., Guirola Céspedes, C., de Armas Martínez, A. C., Albornas Carvajal, Y., and Villanueva Ramos, G. (2020). Valorización de la lignina en el concepto de biorrefinería (i). *Centro Azúcar*, 47(3):95–105. Online:https://n9.cl/7s8xr.
- Hernández Benítez, R. and Céspedes Rangel, J. (2019). Biorrefinería: una oportunidad energética para el desarrollo bioeconómico de la guajira. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 3(2):38–51. Online:https://n9.cl/g1yup2.
- Huamaní Huamaní, G. and Eyzaguirre Tejada, R. (2015). Modelo de aplicación de ahp para seleccionar editor de contenidos de objetos de aprendizaje (modelo pajoa – ecoa). *Industrial Data*, 18(2):121–125. Online:https://n9.cl/pz4h2.
- INEC (2020). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Technical report, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Iriondo-DeHond, A., Iriondo-DeHond, M., and del Castillo, M. D. (2020). Applications of compounds from coffee processing by-products. *Biomolecules*, 10(9):1219. Online:https://n9.cl/97tuv.
- Jaffar, M. M., Nahil, M. A., and Williams, P. T. (2020). Pyrolysis-catalytic hydrogenation of cellulose-hemicellulose-lignin and biomass agricultural wastes for synthetic natural gas production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 145:104753. Online:https://n9.cl/jngsk.
- Jędrzejczyk, M., Soszka, E., Czapnik, M., Ruppert, A. M., and Grams, J. (2019). Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass. In *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels*, pages 143–196. Online:https://n9.cl/6whw8.
- Jiménez, R., López Bastida, E. J., Bravo Amarante, E., Álvarez González, A. L., and Hernández Nodarse, M. T. (2020). Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método ahp. *Universidad Y Sociedad*, 12(1):73–79. Online:https://n9.cl/pvhom2.
- Jiménez Borges, R., Álvarez González, A. L., López Bastida, E. J., and Bermúdez Chou, A. d. I. C. (2019). Herramientas de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad de biomásas. *Revista de Investigación*, 12(2):151–164. Online:https://n9.cl/yrvak.
- Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A., and Kiggundu, N. (2018). Characterization of banana peels wastes as potential slow pyrolysis feedstock. *Journal of Sustainable Development*, 11(2):14–24. Online:https://n9.cl/kp2d7.
- Katakojwala, R. and Mohan, S. V. (2021). A critical view on the environmental sustainability of biorefinery systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27:100392. Online:https://n9.cl/o7n09.
- Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghaghi, M., Aghbashlo, M., Karimi, K., and Tabatabaei, M. (2020). Conversion of residues from agro-food industry into bioethanol in iran: An under-valued biofuel additive to phase out mtbe in gasoline. *Renewable Energy*, 145:699–710. Online:https://n9.cl/h5tav.
- Kluska, J., Ochnio, M., and Kardaś, D. (2020). Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. *Waste Management*, 105:560–565. Online:https://n9.cl/hrzi8.
- Konde, K. S., Nagarajan, S., Kumar, V., Patil, S. V., and Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in india: Potential and challenges. *Sustainable Energy and Fuels*, 5(1):52–78. Online:https://n9.cl/g3zkn.
- Korányi, T. I., Fridrich, B., Pineda, A., and Barta, K. (2020). Development of “lignin-first” approaches for the valorization of lignocellulosic biomass. *Molecules*, 25(12):2815. Online:https://n9.cl/iz0cj.
- Kover, A., Kraljić, D., Marinaro, R., and Rene, E. R. (2021). Processes for the valorization of food and agricultural wastes to value - added products: recent practices and perspectives. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 2:50–66. Online:https://n9.cl/ms99q.
- Ku Ahmad, K., Sazali, K., and Kamarolzaman, A. A. (2018). Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. *Materials Today: Proceedings*, 5(10):21744–21752. Online:https://n9.cl/whkegt.

- Kumar, A., Gautam, A., and Dutt, D. (2016). Biotechnological transformation of lignocellulosic biomass in to industrial products: An overview. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 7(3):149–168. Online:https://n9.cl/5bfmw.
- Kumar, A. K., Sharma, S., Shah, E., and Patel, A. (2018). Technical assessment of natural deep eutectic solvent (nades) mediated biorefinery process: A case study. *Journal of Molecular Liquids*, 260:313–322. Online:https://n9.cl/d3mys.
- Kumari, D. and Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:877–891. Online:https://n9.cl/f8qfqp.
- Lorenci Woiciechowski, A., Neto, C. J. D., de Souza Vandenberghe, L. P., de Carvalho Neto, D. P., Sydney, A. C. N., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Zevallos Torres, L. A., and Soccol, C. R. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – conventional processing and recent advances. *Bioresource Technology*, 304:122848. Online:https://n9.cl/a8l6s.
- Luna, K., Guanin, J., and Cordero, G. (2019). Aplicación de un proceso analítico jerárquico (ahp) para mejorar la gestión de inventarios en cadenas de abastecimientos. *Ecuadorian Science Journal*, 3(2):25–32. Online:https://n9.cl/ooveb.
- Álvarez, A. (2016). Caracterización fisicoquímica de varios residuos agroindustriales y sus mezclas para la producción de biocombustible.
- Manabí Produce (2021). Manabí produce archivos - gobierno de manabí ecuador. Manabí PRODUCE. Online:https://n9.cl/vub7v7.
- MANABÍ PRODUCE-EP (2016). Manabí produce. Manabí PRODUCE.
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., and Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334:125235. Online:https://n9.cl/wz9mm.
- Martínez-Ángel, J. D., Villamizar-Gallardo, R. A., and Ortíz-Rodríguez, O. O. (2015). Caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) como fuente de energía renovable. *Agrociencia*, 49(3):329–345. Online:https://n9.cl/jvifo.
- Mathew, A. K., Abraham, A., Mallapureddy, K. K., and Sukumaran, R. K. (2018). Lignocellulosic biorefinery wastes, or resources? In *Waste Biorefinery*, pages 267–297. Online:https://n9.cl/35ysd. Elsevier.
- Michelin, M., Gomes, D. G., Romaní, A., Polizeli, M. D. L. T., and Teixeira, J. A. (2020). Nanocellulose production: Exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. *Molecules*, 25(15):3411. Online:https://n9.cl/ell0n.
- Mongkhonsiri, G., Gani, R., Malakul, P., and Assabumrungrat, S. (2018). Integration of the biorefinery concept for the development of sustainable processes for pulp and paper industry. *Computers and Chemical Engineering*, 119:70–84. Online:https://n9.cl/580ru.
- Montiel, K. and Romero, L. (2015). Obtención de bioetanol a partir de la coronta(olote) del maíz variedad hs-5, por el método de hidrólisis ácida diluida - fermentación separada, laboratorios de química.
- Mora-Villalobos, J. A., Aguilar, F., Carballo-Arce, A. F., Vega-Baudrit, J. R., Trimino-Vazquez, H., Villegas-Peñaranda, L. R., Stöbener, A., Eixenberger, D., Bubenheim, P., Sandoval-Barrantes, M., and Liese, A. (2021). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part i: coffee and palm oil by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13:1469–1487. Online:https://n9.cl/razmga.
- Morato, T., Vaezi, M., and Kumar, A. (2019). Assessment of energy production potential from agricultural residues in bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102:14–23. Online:https://n9.cl/zwl8c9.
- Moreno, A. D., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., and Negro, M. J. (2019). Pretreatment technologies for lignocellulosic biomass deconstruction within a biorefinery perspective. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, pages 379–399. Online:https://n9.cl/8mbtr3.

- Muñoz-Muño, D., Pantoja-Matta, A. J., and Cuatin-Guarin, M. F. (2014). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2):10–19. Online:https://n9.cl/5b9a6.
- Murthy, P. S. and Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66:45–58. Online:https://n9.cl/55t7te.
- Navarrete Loza, M. C. and Saavedra Cuadrado, E. K. (2014). Análisis y comparación económica de la crisis del auge petrolero ecuatoriano en relación a los periodos de 1970 y 2000.
- Nieder-Heitmann, M., Haigh, K., and Görgens, J. F. (2019). Process design and economic evaluation of integrated, multi-product biorefineries for the co-production of bio-energy, succinic acid, and polyhydroxybutyrate (phb) from sugarcane bagasse and trash lignocelluloses. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(3):599–617. Online:https://n9.cl/k6bewl.
- Nosratpour, M. J., Karimi, K., and Sadeghi, M. (2018). Improvement of ethanol and biogas production from sugarcane bagasse using sodium alkaline pretreatments. *Journal of Environmental Management*, 226:329–339. Online:https://n9.cl/e120g.
- Oh, Y. H., Eom, I. Y., Joo, J. C., Yu, J. H., Song, B. K., Lee, S. H., Hong, S. H., and Park, S. J. (2015). Recent advances in development of biomass pretreatment technologies used in biorefinery for the production of bio-based fuels, chemicals and polymers. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32:1945–1959. Online:https://n9.cl/86d5t5.
- Oliveira, G., Ferreira, P., Coimbra, M. A., and Gonçalves, I. (2021). Coffee by-products and their suitability for developing active food packaging materials. *Foods*, 10(3):683. Online:https://n9.cl/ji3qf.
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., and Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2):83–107. Online:https://n9.cl/5qisge.
- Owolabi, S. T., Madi, K., Kalumba, A. M., and Ori-moloye, I. R. (2020). A groundwater potential zone mapping approach for semi-arid environments using remote sensing (rs), geographic information system (gis), and analytical hierarchical process (ahp) techniques: a case study of buf-falo catchment, eastern cape, south africa. *Ara-bian Journal of Geosciences*, 13(1184). Online:https://n9.cl/kqrhs.
- Palacios Vallejos, K. Y., Romero, M. A., and Rose-ro, E. A. (2020). Estimación de las propiedades físico-químicas de residuos agroindustriales para el aprovechamiento como biocombustible. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 4(2):28. Online:https://n9.cl/8au0o.
- Parralejo, A. I., Royano, L., González, J., and González, J. F. (2019). Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. *Industrial Crops and Products*, 131:307–314. Online:https://n9.cl/d4d4w.
- Pazmiñon Sánchez, J., Vargas García, Y., and Dá-vila Rincón, J. (2017). Perspectivas de las bio-refinerías y situación actual de los biocombus-tibles en Ecuador como país emergente. *Perfiles Revista Científica*, 2(18):51–76. Online:https://n9.cl/dc9jcp.
- Qazi, W. A., Abushammala, M. F., and Azam, M. H. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in sultanate of Oman. *Waste Mana-gement and Research*, 36(7):594–605. Online:https://n9.cl/an1kai.
- Rambo, M. K. D., Schmidt, F. L., and Ferreira, M. M. C. (2015). Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, 144:696–703. Online:https://n9.cl/moss0.
- Ramírez, G., Álvarez Aros, E., and Nuño De La Pa-rra, P. (2020). Proceso analítico jerárquico y selección estratégica de proveedores: un estudio bi-bliométrico. *Revista Espacios*, 41(29):255–272. On-line:https://n9.cl/gi0fu.
- Redondo-Gómez, C., Rodríguez Quesada, M., Va-llejo Astúa, S., Murillo Zamora, J. P., and Lopretti, M. y Vega-Baudrit, J. R. (2020). Biorefinery of bio-mass of agro-industrial banana waste to obtain

- high-value biopolymers. *Molecules*, 25(17):1–13. Online:https://n9.cl/o7k0p.
- Requiso, P. J., Nayve Jr, A. C., Ventura, R., Escobar, E., and Ventura, J. (2018). Agricultural residue feedstock selection for polyhydroxyalkanoates production using ahp-gra. *Philippine Journal of Science*, 147(4):693–704. Online:https://n9.cl/ih916.
- Restrepo-Serna, D. L., Martínez-Ruano, J. A., and Cardona-Alzate, C. A. (2018). Energy efficiency of biorefinery schemes using sugarcane bagasse as raw material. *Energies*, 11(12):1–12. Online:https://n9.cl/qvilgj.
- Rojas, A. F., Flórez, C., and López, D. F. (2018). Use prospects of some agroindustrial waste. *Revista Cubana de Química*, 31(1):31–51. Online:https://n9.cl/unwo9.
- Saaty, T. L. (2014). *Toma De Decisiones para Líderes*. Edición Kindle. Online:https://n9.cl/3r5pr.
- Saavedra-Sanabria, O. L., Durán, D., Cabezas, J., Hernández, I., Blanco-Tirado, C., and Combariza, M. Y. (2021). Cellulose biosynthesis using simple sugars available in residual cacao mucilage exudate. *Carbohydrate Polymers*, 274:1–12. Online:https://n9.cl/fas5x.
- Shahbaz, M., Al-Ansari, T., Aslam, M., Khan, Z., Inayat, A., Athar, M., Naqvi, S. R., Ahmed, S. A., and McKay, G. (2020). A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(30):15166–15195. Online:https://n9.cl/zq6a84.
- Sharma, D. and Saini, A. (2020). *Lignocellulosic Waste Valorization and Biorefineries Concept*, volume 1, pages 195–215. Online:https://n9.cl/t8pf7g. Springer.
- Sisti, L., Celli, A., Totaro, G., Cinelli, P., Signori, F., Lazzeri, A., Bikaki, M., Corvini, P., Ferri, M., Tassoni, A., and Navarini, L. (2021). Monomers, materials and energy from coffee by-products: A review. *Sustainability*, 13(12):6921. Online:https://n9.cl/2hfkd.
- Sumba, E. F. S., Cantos, J. A. M., and Intriago, G. F. C. (2019). Sugar cane and its environmental impact in conton junin, province of manabí. *International Journal of Life Sciences*, 3(2):1–7. Online:https://n9.cl/ly735.
- Tsai, W. T., Bai, Y. C., Lin, Y. Q., Lai, Y. C., and Tsai, C. H. (2020). Porous and adsorption properties of activated carbon prepared from cocoa pod husk by chemical activation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(1):35–43. Online:https://n9.cl/tq354.
- Widjaja, T., Nurkhamidah, S., Altway, A., Rohmah, A. A., and Saepulah, F. (2021). Chemical pre-treatments effect for reducing lignin on cocoa pulp waste for biogas production. In *4Th International Seminar on Chemistry*, volume 2349, page 020058. Online:https://n9.cl/devqw.
- Yang, X., Wang, H., Strong, P. J., Xu, S., Liu, S., Lu, K., Sheng, K., Guo, J., Che, L., He, L., Ok, Y. S., Yuan, G., Shen, Y., and Chen, X. (2017). Thermal properties of biochars derived from waste biomass generated by agricultural and forestry sectors. *Energies*, 10(4):469. Online:https://n9.cl/wnfq3.
- Yousuf, A., Pirozzi, D., and Sannino, F. (2020). Fundamentals of lignocellulosic biomass. In *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*, pages 1–15. Online:https://n9.cl/f661v. Academic Press.
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołębowski, W., and Szczepanik, M. (2018). Chemical characteristics of biomass ashes. *Energies*, 11(11):2885. Online:https://n9.cl/w2zdft.
- Zamora Rueda, G. H., Mistretta, M. G., Peralta, F. L., Gutiérrez, C. E., Feijóo, E. A., Golato, M. A., and Paz, D. (2015). Caracterización energética del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (rac) de tucumán, argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 36:49–55. Online:https://n9.cl/rb2u7.
- Zinla, D., Gbaha, P., Koffi, P. M. E., and Koua, B. K. (2021). Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in côte d'ivoire. *Fuel*, 283:119250. Online:https://n9.cl/nykge.

Apéndice

Tabla A 1. Matriz normalizada del criterio potencial energético.

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	5	5	5	5	0,2	0,246	0,495
Cáscara de cacao	0,2	1	1	0,333	0,2	0,143	0,036	0,073
Mucílago de cacao	0,2	1	1	0,333	0,333	0,143	0,039	0,078
Olote de maíz	0,2	3	3	1	0,333	0,143	0,068	0,137
Cáscara de plátano	0,2	5	3	3	1	0,2	0,115	0,231
Bagazo de caña de azúcar	5	7	7	7	5	1	0,497	1

Tabla A 2. Matriz normalizada del criterio de composición

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	0,333	7	7	5	1	0,231	0,53
Cáscara de cacao	3	1	7	5	5	5	0,435	1
Mucílago de cacao	0,143	0,143	1	1	0,333	0,143	0,035	0,079
Olote de maíz	0,143	0,2	1	1	1	0,143	0,046	0,107
Cáscara de plátano	0,2	0,2	3	1	1	1	0,081	0,187
Bagazo de caña de azúcar	1	0,2	7	7	1	1	0,172	0,397

Tabla A 3. Matriz normalizada del criterio de rendimiento de biomasa

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	5	7	7	3	0,2	0,234	0,471
Cáscara de cacao	0,2	1	3	5	0,333	0,143	0,075	0,150
Mucílago de cacao	0,143	0,333	1	1	0,2	0,143	0,033	0,067
Olote de maíz	0,143	0,2	1	1	0,2	0,143	0,032	0,064
Cáscara de plátano	0,333	3	5	5	1	0,2	0,129	0,260
Bagazo de caña de azúcar	5	7	7	7	5	1	0,497	1

Tabla A 4. Matriz normalizada del criterio de costo de procesamiento

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	1	1	5	1	0,333	0,148	0,401
Cáscara de cacao	1	1	3	9	7	3	0,370	1
Mucílago de cacao	1	0,333	1	3	3	0,333	0,117	0,317
Olote de maíz	0,2	0,111	0,333	1	1	0,143	0,037	0,101
Cáscara de plátano	1	0,143	0,333	1	1	0,2	0,060	0,161
Bagazo de caña de azúcar	3	0,333	3	7	5	1	0,267	0,721

Tabla A 5. Matriz normalizada del criterio de impacto ambiental

	Cascarilla de café	Cáscara de cacao	Mucílago de cacao	Olote de maíz	Cáscara de plátano	Bagazo de caña de azúcar	Normal	Ideal
Cascarilla de café	1	7	9	5	3	1	0,328	0,875
Cáscara de cacao	0,143	1	1	5	0,2	0,143	0,063	0,169
Mucílago de cacao	0,111	1	1	1	0,2	0,143	0,040	0,106
Olote de maíz	0,2	0,2	1	1	0,2	0,143	0,036	0,097
Cáscara de plátano	0,333	5	5	5	1	0,2	0,158	0,421
Bagazo de caña de azúcar	1	7	7	7	5	1	0,375	1