

Utilización de residuos agroindustriales en la elaboración de materiales

Use of agroindustrial waste in the manufacture of materials

Dayana Paola Morales Escobar¹, Álvaro Ángel Arrieta Almario²

Resumen

Las diversas industrias producen volúmenes significativos de subproductos como parte inherente de sus operaciones, los cuales son difíciles de eliminar, generando preocupaciones ambientales. Entre estos se encuentran los residuos agroindustriales, despertando el interés de los científicos debido a sus componentes biológicos, los cuales pueden ser aprovechados para la elaboración de materiales. Este artículo tiene como propósito recopilar información sobre el aprovechamiento de los residuos agroindustriales para la elaboración de materiales. Para esto, mediante un enfoque cualitativo, en fuentes académicas y científicas, se llevó a cabo una revisión bibliográfica —obtenida de bases de datos como Scopus, Redalyc, Scielo y Dialnet, entre los años 2019-2023— donde fueron seleccionadas 63 mediante métodos de inclusión y exclusión. El análisis de la información permitió identificar que a partir de residuos agroindustriales —como bagazo, cáscaras, orujo, semillas, paja, cenizas, entre otros— se puede elaborar materiales en la industria de la construcción, bioplásticos, biocombustibles, bioadsorbentes, biosurfactantes, nanomateriales y biofertilizantes, permitiendo mitigar los impactos ambientales negativos provocados al ambiente, brindando un valor agregado y encaminando hacia la dinámica de sostenibilidad y economía circular. Lo anterior, permite evidenciar que, aunque ya se han realizado materiales a base de residuos agroindustriales, es importante seguir avanzando en lo que respecta a la investigación e innovación en el área, como un ejercicio de exploración hacia nuevas alternativas.

Palabras clave: residuos agroindustriales, biomateriales, nanomateriales, alternativas, economía circular.

1 Bióloga. Universidad de Sucre. Joven Investigador del Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación en Materiales Avanzados DEIMAV de la Universidad de Sucre. Correo electrónico: paolaescobar21@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6184-6734>.

2 Doctor en Química Avanzada. Licenciado en Química y Biología. Docente e Investigador del programa de Biología de la Facultad de Educación y Ciencias de la Universidad de Sucre. Correo electrónico: alvaro.arrieta@unisucra.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-847X>.

Abstract

Various industries produce significant volumes of byproducts as an inherent part of their operations, which are difficult to eliminate, raising environmental concerns. Among these are agroindustrial waste, awakening the interest of scientists due to its biological components, which can be used to produce materials. The purpose of this article is to collect information on the use of agroindustrial waste to produce materials. For this, using a qualitative approach, in academic and scientific sources, a bibliographic review was carried out—obtained from databases such as Scopus, Redalyc, Scielo and Dialnet, between the years 2019-2023— where 63 were selected using research methods. inclusion and exclusion. The analysis of the information allowed us to identify that from agroindustrial waste—such as bagasse, peels, pomace, seeds, straw, ashes, among others—materials can be produced in the construction industry, bioplastics, biofuels, bioadsorbents, biosurfactants, nanomaterials. and biofertilizers, allowing us to mitigate the negative environmental impacts caused to the environment, providing added value and moving towards the dynamics of sustainability and circular economy. The above makes it clear that, although materials based on agro-industrial waste have already been made, it is important to continue advancing regarding research and innovation in the area, as an exercise in exploring new alternatives.

Keywords: agroindustrial waste, biomaterials, nanomaterials, alternatives, circular economy.

Introducción

Las distintas industrias generan grandes cantidades de subproductos y residuos que resultan inherentes a su operación y que difícilmente pueden ser eliminados, generando preocupaciones ambientales y de salud (Abotbina *et al.*, 2022), por lo que los científicos están interesados en el uso de métodos novedosos para su erradicación (Abdelraof *et al.*, 2022). Entre los problemas ambientales y desafíos que enfrentan las industrias se tiene la permanencia prolongada en vertederos, las emisiones de gases de efecto invernadero durante la quema, que contribuyen al cambio climático, los daños irreversibles a los ecosistemas, provocando la pérdida de biodiversidad, contaminación del suelo y del agua (Palve *et al.*, 2021), además del agotamiento de los recursos no renovables debido a su extracción y consumo continuo (Castillo *et al.*, 2021) lo anterior, repercutiendo en el sector salud (Díaz *et al.*, 2022) y así mismo en la economía.

La biomasa residual se produce gracias a la industria forestal y maderera, la agroindustria, procesamiento de alimentos, desechos animales y municipales (Palve *et al.*, 2021), sin embargo, el permitir que éstos recursos sean biodegradados de manera

incontrolada representa una afectación directa al ambiente, por lo que estos han despertado interés para su aprovechamiento debido a sus componentes biológicos, los cuales pueden ser recuperados por medio de distintos procesos de conversión en múltiples productos de valor, encaminando esta práctica a la sostenibilidad, contribuyendo a mantener o mejorar las condiciones sociales y materiales para la salud humana y el ambiente a través del tiempo, sin superar las capacidades ecológicas que la sustentan (Gómez *et al.*, 2019). Con base a lo anterior, surge la necesidad de elaborar biomateriales a partir de fuentes de biomasa animal y vegetal (Alcivar *et al.*, 2022), con potencial innovador, sostenible y biotecnológico (Aguiar *et al.*, 2022). Por esto, es necesario saber qué, para convertir un residuo en un biomaterial, es relevante entender su estructura interna y propiedades, para poder agregar componentes que ayuden a mejorar las características y cumplir con los requisitos necesarios para su posterior uso, logrando optimizar el material y su funcionalidad (Castaño, 2020).

Se hace referencia a la agroindustria como un conjunto de procesos manufactureros que implican la transformación de materias primas agrícolas en productos con valor agregado (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2023), volviéndose la industria alimentaria con uno de los segmentos más sobresalientes y cruciales del sector económico, pero también como una de las mayores productoras de grandes cantidades de residuos (Preciado *et al.*, 2022).

Los residuos agroindustriales se han convertido en objeto de interés por sus características físicas, químicas y biológicas (Aguiar *et al.*, 2022), así mismo por su amplia disponibilidad, renovabilidad, biodegradabilidad y bajo consumo de energía, teniendo un enorme potencial aprovechable de aplicación en las diferentes industrias como la medicina, la construcción, la agroalimentaria, entre otras, mitigando simultáneamente los impactos ambientales negativos, agregando valor al uso de estos residuos y mejorando la economía de las regiones. Es por ello, que este artículo tiene como propósito recopilar información sobre el aprovechamiento de los residuos agroindustriales para la elaboración de materiales.

Composición de residuos agroindustriales

Muchos residuos agroindustriales están compuestos de complejos de polisacáridos, carbohidratos (almidón, azúcar de caña), compuestos polifenólicos, proteínas y lípidos (aceites vegetales (Cornejo *et al.*, 2020). Siendo más específico la biomasa lignocelulósica cuenta con tres polímeros fundamentales como la celulosa (40 %–60 %), hemicelulosa (20 % – 40 %) y lignina (10 %- 24 %), cuyo contenido puede cambiar dependiendo al tipo de planta, cultivo, edad y condiciones climáticas (Khatiwada *et al.*, 2021).

Camino a la dinámica de economía circular

Dentro de todo esto, es pertinente destacar que gracias a estrategias como la elaboración de materiales a base de residuos es posible potencializar y cambiar el enfoque actual de los mercados que se basan principalmente en economías lineales (producir, usar y desechar) y adoptar economías circulares (producir, usar, reciclar), la cual busca mejorar los procesos productivos y de desarrollo por medio de la reducción de la entrada de materias primas verdes, la disminución de los desechos generados en los distintos procesos, mejorando el índice de consumo y disposición de materiales, así mismo la reducción de los costos económicos y los reprocesos en las actividades productivas y de desarrollo para las organizaciones (Castaño, 2020). Una economía cuya finalidad es alcanzar un desarrollo sostenible que promueva la calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, beneficiando tanto a las generaciones de ahora como a las futuras (Maldonado *et al.*, 2022).

Principales Problemas de Contaminación

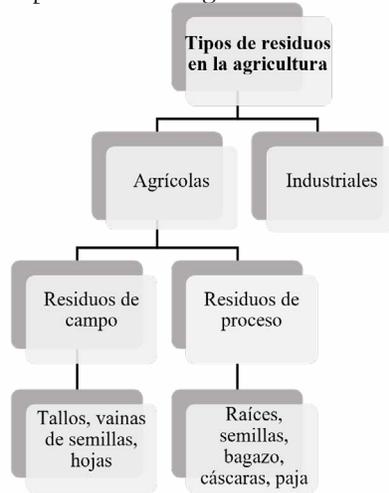
Haciendo énfasis, dentro de los problemas principales de contaminación ambiental está la producción del plástico, que desde los años 50 ha experimentado un crecimiento anual compuesto del 8,4% convirtiéndose en la clase de materiales manufacturados con mayor crecimiento. Los plásticos constituyen uno de los residuos sólidos más significativos, en 2019 la producción global fue de 370 millones de toneladas, proyectando que la cifra aumente a 900 millones de toneladas para el año 2050 (Morales *et al.*, 2023). Asimismo, se espera que la fabricación de este utilice la mitad de la demanda mundial de petróleo en el 2050, provocando emisiones superiores a 56 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), representando un aproximado del 10-13% del presupuesto de carbono restante (Famiglietti *et al.*, 2023). De acuerdo con lo descrito en Madrid *et al.* (2021) la producción de residuos en Colombia es de aproximadamente 12 millones de toneladas, estimando que 53% proviene de desechos agroindustriales, donde gran parte de esta biomasa contiene altos niveles de aceite, convirtiéndolos en un recurso aprovechable en el sector energético. Según Morales *et al.* (2023) se generan mundialmente aproximadamente 5.5 millones de toneladas de residuos agrícolas cada año, mientras que en Colombia los centros de suministros de alimentos y la industria agroindustrial contribuyen con alrededor 72 millones de toneladas de biomasa residual.

Tipos de residuos en la agricultura

La agricultura ha sido la actividad fundamental en la provisión de productos esenciales convirtiéndose en el sector más importante en varios países. Sin embargo, las industrias relacionadas con agricultura generan gran cantidad de residuos que se derivan

de la producción y procesamiento de los productos agrícolas cada año. Estos residuos se clasifican en agrícolas e industriales, donde los primeros se subdividen en residuos de campo y de proceso. Los residuos de campo hacen alusión a aquellos restos dejados en el suelo después una cosecha, mientras que los de proceso se obtienen, como su nombre lo indica, luego del procesamiento del cultivo para obtener productos de valor como se citan en la Figura 1 (Astudillo *et al.*, 2023).

Figura 1. Tipos de residuos generados en la agricultura.



Nota. En la figura 1 se observa la clasificación de los residuos de la agricultura, su subdivisión y ejemplos. Astudillo *et al.* (2023).

Metodología

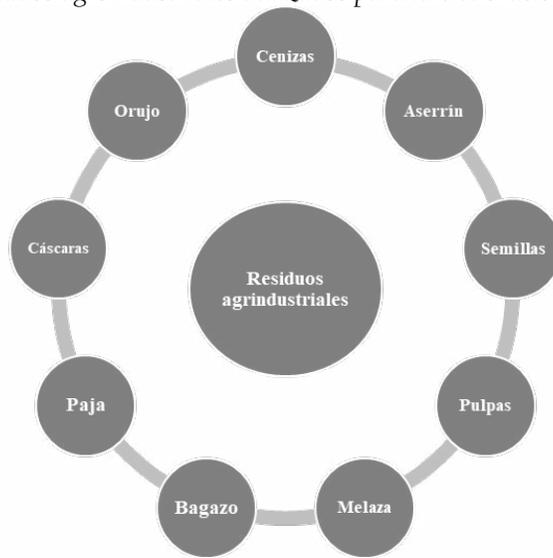
La metodología se basa en un análisis cualitativo, donde se efectuó una búsqueda y recopilación de la literatura mediante la revisión de fuentes científicas, académicas y libros relacionados con la elaboración de materiales a partir de residuos agroindustriales. La búsqueda del material bibliográfico se realizó en el buscador Google Académico y las bases de datos Scopus, Redalyc, Scielo y Dialnet, utilizando palabras clave en español como “residuos” “agroindustrial” y “biomateriales”, y asimismo sus traducciones al inglés. Se consideró solo la literatura de acceso abierto publicada entre los años 2019-2023. Se establecieron criterios de inclusión como el idioma español, inglés y portugués. Del mismo modo, a las áreas temáticas que se relacionaban con las ciencias naturales y exactas, excluyendo a aquellas correspondientes con arte y humanidades, y ciencias sociales. Para llevarlo a cabo, se emplearon los operadores booleanos “AND” y “OR”.

Se identificaron 112 publicaciones durante la búsqueda. Sin embargo, luego de hacer una lectura crítica de la información presentada por cada una, se excluyeron 49.

Resultados y discusión

Los residuos agroindustriales tienen un gran potencial para ser aprovechados en diversas formas, permitiendo la creación de productos novedosos y la generación de valor agregado a productos ya existentes. Como resultado de esta revisión se identificaron los residuos agroindustriales más comunes que se usan de acuerdo con las investigaciones evidenciadas en la Figura 2. Asimismo, los tipos de aprovechamiento, como en la elaboración de productos de interés en la construcción, producción de bioenergéticos como los biocombustibles (biogás, bioetanol, biodiesel y pellets), bioplásticos bioabsorbentes, fabricación de papel, biofertilizantes, biosurfactantes, aglomerados y nanomateriales.

Figura 2. Residuos agroindustriales utilizados para la elaboración de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Construcción

Existe una verdad ineludible y es que la población está experimentando un aumento desmesurado, conduciendo a una creciente urbanización (Enríquez, 2019) y con ello el requerimiento de utilizar materiales de construcción. Si bien sabemos, esta industria tiene un impacto significativo en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

debido al uso de energía durante la fabricación y el transporte de materiales contribuye al deterioro del ambiente. Por tal motivo, se hace necesario seleccionar adecuadamente materiales de construcción que ayuden a disminuir estas problemáticas. Es por ello que, esta industria se propone como desafío reducir las emisiones que se dan durante la extracción, transporte y producción de materiales (Castaño, 2020).

Con base en lo anterior, en la industria de la construcción se han creado alternativas para contribuir con la eliminación de los residuos agroindustriales, utilizándolos como materiales que reemplazan a los agregados convencionales, es decir, en lugar del agregado fino se pueden utilizar los desechos de tallos de sorgo, cáscara de arroz y maní para mejorar la aislación térmica y resistencia a la compresión. En cuanto al reemplazo del cemento, se pueden emplear desechos de aceituna, cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cáscara de arroz, los cuales pueden mejorar la resistencia a la compresión, la aislación térmica y la permeabilidad. Finalmente, para sustituir la arcilla, se encuentra la paja, aserrín, café molido y papel, que coadyuvan a mejorar la resistencia a la compresión, la absorción del agua, la aislación térmica y la absorción sísmica (Muñoz Pérez *et al.*, 2021). Según lo descrito por Bernal (2019) afirma que con tamo de arroz obtenido del cultivo y el cemento se han elaborado ladrillos, siendo un compuesto adecuado tanto para construcciones nuevas como para edificaciones existentes.

Estos residuos sirven para la elaboración de ladrillos ecológicos, los cuales tienen un impacto ambiental positivo, ya que su fabricación implica una mezcla de suelo, agua y cemento, además de la incorporación del material reciclado como aditivo para reemplazar alguno de sus componentes. Esta mezcla es prensada a una temperatura ambiente y adquiere diferentes características dependiendo del material reciclado utilizado. Mientras que, para el ladrillo tradicional, debido a su proceso de cocción, emite alrededor de 0.41 kg de CO₂ por cada ladrillo producido, considerándose menos amigable para el ambiente. Por lo tanto, este tipo de material se convierte en una solución para personas de bajos recursos económicos y para aquellos que viven en zonas rurales, calurosas y lluviosas, así como para la construcción de viviendas en zonas sísmicas (Muñoz Pérez *et al.*, 2021).

Según lo descrito por Castillo *et al.* (2021) la ceniza que se genera a partir de los residuos agroindustriales es viable utilizarla en la mezcla de concreto, ya que han observado que el material resultante cuenta con propiedades mecánicas óptimas, entre estas las cenizas del bagazo de la caña de azúcar y cenizas de cascarilla de arroz (CCA), que han demostrado ser benéficos en la resistencia del concreto. Asimismo, se ha encontrado que la adición de un 5% de CCA incrementa la resistencia a la compresión del concreto. Lo cual también es afirmado por do Couto *et al.* (2019), el cual añade que estas cenizas también son usadas como aditivos minerales en la producción de morteros.

La incorporación de cascarilla de café en mezclas de concreto arquitectónico es factible como reemplazo del agregado grueso, demostrando resistencia, durabilidad, cohesión entre los materiales y homogeneidad en la pigmentación en igual medida que el concreto convencional (Moreno *et al.*, 2022)

Bioplásticos

Los plásticos representan un problema global, en parte se debe al aumento de la población y su conexión con los factores socioeconómicos y culturas que fomentan el uso excesivo de éstos, creyendo que esta misma tendencia paralela la continúe con la producción de alimento (Cornejo *et al.*, 2020).

En promedio, se generan 0.64 kg de residuos por personas a nivel mundial, pero específicamente en Colombia la proporción es mayor, con una producción diaria por persona de 0.95 kg, relacionándose el consumo directamente con plásticos de un solo uso, como pitillos, cubiertos, empaques, envases y tapas. Teniendo en cuenta la vida útil corta y el largo proceso de descomposición se buscan alternativas sostenibles (Castaño, 2020) con el propósito de minimizar los recursos fósiles, la huella de carbono, costos de producción (Chicaiza y Robles, 2021), gases de efecto invernadero, componentes carcinógenos y con contaminación de los diferentes recursos naturales del planeta y la diversidad biológica marina, estimándose alrededor de 8 millones de plásticos que terminan anualmente en los océanos, por lo que se espera que la cantidad siga aumentando debido al amplio uso de productos derivados del petróleo como el polipropileno, el poliestireno y tereftalato de polietileno (Francisco *et al.*, 2021). Como resultado, la creciente preocupación sobre los problemas ambientales globales asociados con los plásticos a base de petróleo ha llevado a un aumento en el interés en las fibras naturales y los biopolímeros como materiales ecológicos (Abotbina *et al.*, 2022).

El almidón se ha convertido en un biopolímero próspero para sustituir los polímeros a base del petróleo, ya que se ha vuelto atractivo por su abundancia, renovabilidad, biodegradabilidad y bajo costo de fabricación en comparación con los procesos petroquímicos. La obtención de almidón termoplástico implica alterar la estructura molecular por medio de técnicas químicas y térmicas, el cual puede ser conformado en forma de película biodegradable y mezclado como compuesto biológico (Cornejo *et al.*, 2020).

Buscando a su vez minimizar los costos de operación de vertederos y desechos municipales. Los almidones más usados para fabricar biopolímeros son los de maíz, patata, arroz, sagú, trigo y yuca. Sin embargo, el almidón cuenta con algunas desventajas como la fragilidad en ausencia de plastificantes, mala resistencia al agua debido a su naturaleza hidrofílica, naturaleza débil y blanda en presencia de plastificantes y el

debilitamiento de las propiedades mecánicas en condiciones de alta humedad, para esto, se han realizado estudios que las fibras naturales como celulosa, hemicelulosa y lignina reforzadas con la mezcla de biopolímeros termoplásticos pueden mejorar las propiedades mecánicas (Abotbina *et al.*, 2022). Debido a esto, se ha prestado una atención especial al uso de los residuos agrícolas como semillas, bagazo y cáscaras, ya que son una fuente potencial de fibras (Francisco *et al.*, 2021). Una de las fibras utilizadas ha sido la fibra de coco (Abotbina *et al.*, 2022). Por otra parte, según Alcivar *et al.* (2022) se generan residuos orgánicos durante la producción y procesamiento del plátano como hojas, pseudotallos, cáscaras y frutos, representando entre el 20 % y 30%. Estos desechos incluyen compuestos valiosos como celulosa, hemicelulosa y almidón, los cuales son beneficiosos en la síntesis de bioplásticos. Se han reportado la síntesis de biopolímeros a partir de plátano y almidón de maíz, así mismo de cáscara de plátano y glicerol y como consecuencia se ha conseguido la producción de bioplásticos. Por su parte, según Álvarez *et al.* (2021) a partir del xiloglucano del polvo de la semilla de tamarindo y acrilato de etilo elaboraron un bioplástico llamado b-XgT con el fin de reemplazar el poliestireno, sometiéndose a compostaje y midiendo el CO₂ liberado, indicando también que se biodegrada a los 18 días, perdiendo el 40,3% de la masa, y cuyo pH final fue de 7.1, lo que significó que los compuestos de xilosa favorecen la degradación del polímero en su totalidad. Según Herrera *et al.* (2020) la cáscara de cacao no contiene tanto almidón como otros residuos, aun así, se puede extraer cantidades significativas para la síntesis de biomateriales mediante hidrólisis ácida del almidón y adición de plastificante, así también, se propone a partir de éstas la extracción de azúcares para su fermentación y producción de ácido poliláctico (PLA), el cual es un polímero biodegradable. Los subproductos de mango, jamaica y café pueden ser una valiosa fuente de fibra que puede incorporarse a los bioplásticos, modificando la capacidad de solubilización y aumento en la absorción de agua, así como la resistencia a la fractura de los biopolímeros (Francisco *et al.*, 2021).

Otros estudios han mencionado el uso de subproductos agrícolas en matrices poliméricas, como la incorporación de yute, fique, agave, bagazo de caña, entre otros mejorando propiedades térmicas y mecánicas y obteniendo una mayor compatibilidad entre los componentes, debido a la hidrofiliidad y el débil entrecruzamiento de las fibras, aumentando la adhesión de los componentes dentro de la matriz (Francisco *et al.*, 2021).

La creación de estos materiales renovables contribuye positivamente al ambiente, al disminuir el uso de plásticos no biodegradables, reducir la necesidad de reciclar desechos plásticos y disminuir la huella de carbono provocada por los materiales derivados del petróleo (Abotbina *et al.*, 2022).

Biosurfactantes

Son sustancias químicas con capacidad de reducir la tensión superficial y disolución de compuestos inmiscibles, las cuales son generadas por microorganismos tanto hidrofílicos, como hidrofóbicos y se han convertido en una alternativa de los tensioactivos de base química en lo que respecta a su biodegradabilidad, siendo menos tóxico y produciéndose a partir de materias prima agroindustriales, coadyuvando a mitigar los peligros ambientales de los tensioactivos comunes, abordando la contaminación ambiental a través de la biorremediación, sin embargo, es importante anotar que para su producción a escala industrial aún se requieren estudios para la formulación y optimización de medios de crecimiento nutricionalmente balanceados (Mehmood, T., 2021).

Es posible producir biosurfactantes utilizando materiales de bajo costo como sustratos, tales como residuos lignocelulósicos que provienen de la poda de plantas, lodos de aceite, glicerol, aceite de soja, salvado de trigo, habas de soja, cáscaras de arroz (Camerini *et al.*, 2019), paja de trigo y arroz, cáscara de coco, bagazo de caña de azúcar y desechos de frutas y verduras (Mehmood, T., 2021).

Biocombustibles

Existe una creciente cantidad de residuos agroindustriales, y hacer frente a esto se ha convertido en un reto. Además, existe la necesidad en todo el mundo de encontrar recursos energéticos alternativos que permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover el desarrollo de una cadena de suministro sostenible (Díaz *et al.*, 2022), debido a que al alto consumo de éstos se asocian gases que son potencialmente peligrosos y son vinculados a los gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de azufre (SO), óxido nítrico (NO), entre otros (Sharma, K., 2021).

El alza del precio del petróleo y la preocupación por su disponibilidad sostenible en conjunto con el deterioro del medio ambiente, han aumentado el interés por los biocombustibles como una alternativa para la obtención de nuevas fuentes de energía (Reyes *et al.*, 2020).

Existen residuos agroindustriales con un considerable potencial para la generación de bioenergía mediante la producción de biocombustibles como biogás, bioetanol, biodiesel y pellets.

Biogás

La digestión anaeróbica en un proceso donde los materiales son descompuestos por microorganismos en ausencia de oxígeno que se utiliza para la generación de biogás,

en conjunto con otras tecnologías, con la capacidad de reemplazar en parte la energía obtenida de los hidrocarburos, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental al proporcionar combustible limpio provenientes de fuentes renovables. En cuanto a la producción y calidad del biogás existen falencias, ya que el biogás crudo contiene metano, dióxido de carbono, ácido sulfúrico y otros contaminantes, coadyuvando a su vez a la corrosión en los motores de combustión interna, para la mejora de esa calidad se encuentra en auge el potencial de usar el biocarbón como aditivo durante la digestión anaerobia (Díaz *et al.*, 2022). Se ha reportado el uso de los ácidos grasos de materias prima como la haba de soja, coco, mostaza, aceitunas, semillas de algodón, jatrofa, karanja, linaza y *neem* para la bioconversión de biogás (Dias *et al.*, 2021).

Bioetanol

Un componente importante en el ámbito del transporte y la industria debido a sus consideraciones como fuente de energía sostenible, renovable y respetuosa con el ambiente es el bioetanol (Sierra *et al.*, 2022), cuyo proceso de síntesis consiste en fermentar pentosas y hexosas presentes en la celulosa y hemicelulosa contenida en los diferentes residuos agroindustriales, desechos sólidos municipales y residuos de jardín (Curbelo *et al.*, 2019; Herrera *et al.*, 2020) utilizando macroorganismos. Es esencial aumentar la producción global de energía renovable para contrarrestar los efectos del cambio climático y disminuir su impacto en las comunidades, por lo que la legislación europea ha establecido la meta de mejorar la eficiencia energética en un 32,5% hasta el año 2030. En sintonía con los objetivos y políticos internacionales por los diferentes países, se ha decidido incluir entre un 20 al 30% de etanol en la gasolina (Fontes *et al.*, 2021), puesto que posee límites de inflamabilidad y calor de vaporización más altos (Palve *et al.*, 2021). La producción de bioetanol basado en el aprovechamiento de residuos agrícolas, forestales y agroindustriales se les conoce como bioetanol de segunda generación (2G) (Cisneros *et al.*, 2020)

La yuca, sus fibras, su almidón (Aboitina *et al.*, 2022) orujo de aceituna, poda de olivo (Fontes *et al.*, 2021) se utilizan como materia prima para la producción de bioetanol y energías renovables. Según Mora *et al.* (2021) se ha empleado la pulpa del café y el mucílago como materias primas para su síntesis, utilizando el microorganismo *Saccharomyces cerevisiae* y melaza proveniente de la caña de azúcar, obteniendo un rendimiento fermentativo de hasta un 77%. Según Barrera *et al.* (2020) el jugo obtenido de las piñas de rechazo, es decir, aquellas que no cumplen con las normas para ser comercializadas, contiene la materia prima y nutrientes necesarios para la producción de este alcohol (Murcia *et al.*, 2020). Las cáscaras de patata, piña, arroz, granos de café, residuos de procesamiento de frutas y maíz (Dey y Bhaskarwar, 2021), orujo de manzana,

cáscaras de plátano, hojarasca y melaza de soja también se han usado para su biosíntesis (Shrestha *et al.*, 2021)

La síntesis de bioetanol 2G puede tener impacto positivo en la economía rural y a su vez traer beneficios sociales, ya que su producción genera empleos, principalmente en la recolección de residuos celulósicos, lo que permite una mejora en la sostenibilidad y la reducción de los GEI (Fontes *et al.*, 2021).

Biodiesel

Un tipo de combustible sostenible es el biodiesel, que consiste en alcoholes alifáticos bajos y ésteres de grupos alquilo con alto contenido de ácidos grasos (Shrestha *et al.*, 2021), cuyo uso es amigable con el medio ambiente tras reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) (Mejía y Cuty, 2019), entre otros contaminantes. Está compuesto principalmente por ésteres metílicos de ácido grasos, obtenidos mediante procesos de transesterificación o esterificación a partir de aceites vegetales (Madrid *et al.*, 2021). Los residuos de aceite de canola, colza, palma, soja, residuos de yuca (Shrestha *et al.*, 2021), residuos de semillas de pimiento y bagazo de caña de azúcar son ideales para la producción de este de biodiesel (Reshmy *et al.*, 2021).

Pellets

Otra alternativa es los biocombustibles, los cuales son elaborados con residuos de fuentes vegetales y animales mediante procesos físicos como la densificación o compactación de la biomasa, esto último coadyuva en las desventajas de los residuos como combustibles, debido a su baja densidad física y energética, así mismo con un mayor poder calorífico que la leña tradicional, no emite olores, se logra encender más rápido y evita la tala indiscriminada de árboles. Este material puede reemplazar al carbón mineral en centrales de generación de energía eléctrica. Algunos de los residuos utilizados han sido cascarilla de arroz, paja de arroz, paja de trigo y paja de frijol. Al utilizar los pellets para combustión y liberar energía, los gases que se producen se emplean para generar energía eléctrica y la captura de CO₂ para biocombustibles líquidos, por otro lado, las cenizas se aprovechan para la elaboración de biomateriales capaces de absorber la radiación solar (Gutiérrez *et al.*, 2020). El pellet es una forma eficiente de energía, favorable para el transporte, almacenamiento y manipulación (López *et al.*, 2021). Los residuos derivados de la palma aceitera como hojas, fibras prensadas, racimos de frutas vacíos y cáscara de los granos también son utilizados, convirtiéndose en una opción para utilizar en centrales eléctricas para la generación de energía y en hornos para calefacción de edificios (Mora *et al.*, 2023).

Papel

La industria del papel además de usar madera para su fabricación, la cual proviene de un 17% de bosques primarios, un 54% de bosques secundarios y un 29% de plantaciones de coníferas y par-árboles de hojas caducas (Ordoñez y Sepúlveda, 2019) también consume agua, energía y químicos que impactan negativamente en el ambiente, por lo anterior, el empleo de alternativas para amortiguar esta problemática ha tomado relevancia, tomando como iniciativa el uso de fibras de plantas no leñosas y crecimiento rápido y residuos agroindustriales para la fabricación del papel, ya que tienen un alto contenido de celulosa, entre estos residuos se encuentra la cascarilla de arroz, la cáscara de piña, la paja de trigo, tallos de palma, el tallo de la planta del tabaco, los pseudotallos del banano y el pinzonte de banano, el cual es la fracción que sostiene el manojito de bananos y que es desechado. Sin embargo, la calidad del papel obtenido es posible mejorarla en la etapa de prensa y secado para reducir el porcentaje de agua y que se alargue su tiempo de vida útil (Alvarado *et al.*, 2021). Esto concuerda con el estudio de caracterización fisicoquímica realizado por Ordoñez y Sepúlveda (2019) del pseudotallo del plátano y el epicarpio del café, indicando que son residuos viables para la fabricación del papel, pero de baja calidad, como el papel periódico, que son de un solo uso, sucediendo por la presencia de lignina y otros compuestos confiriendo un color oscuro, reduciendo su estabilidad y resistencia.

Bioadsorbentes

Otro de los tratamientos empleados para los residuos agroindustriales es la generación de carbón biochar, el cual es un sólido rico en carbono producido con materiales ricos en lignina y celulosa por medio de la descomposición térmica de biomásas a temperaturas relativamente bajas (150 °C -300 °C) y en ausencia de oxígeno dando lugar al pirólisis, siendo ecológica y económicamente llamativa debido a que la energía puede producirse simultáneamente. El biocarbón es eficaz para la captura de carbono reduciendo a su vez las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), para mejorar la fertilidad del suelo ya que actúan como fertilizantes y son amortiguadores del pH del suelo, la adsorción de compuestos y metales pesados. Sin embargo, cuenta con efectos negativos cuando no son tratados como la inmovilización de nutrientes, las emisiones de metano y óxido nitroso, la poca retención de agua en el suelo y la liberación de hidrocarburos policíclicos (HAP) y otros compuestos tóxicos, pero como alternativa para tratar esta situación y aumentar los efectos positivos en el suelo se encuentra el compostaje, puesto que es una técnica amigable con el ambiente, económica y rápida, que permite mejorar la calidad del carbón eliminando los compuestos tóxicos y acelerando la formación de grupos funcionales que contengan oxígeno en la superficie, incrementando la reactividad con la fase mineral del

suelo. Las cáscaras de piña y naranja también han sido utilizadas como materia prima para la producción del biochar, que en su mayoría, las cáscaras de naranja han servido como sorbentes de iones de Pb (II), Cd y Cu (II) para tratar el agua (Chávez *et al.*, 2020). Para este último compuesto la fibra de yute es otro residuo para su remoción (Trujillo *et al.*, 2021). Por otro lado, según Díaz *et al.* (2022) los residuos agrícolas de uva podrían utilizarse para la producción de biocarbón, sin embargo, según el mismo autor, aunque esto represente un gran atractivo y potencial por la gran cantidad de residuos vitivinícolas que se producen, existen muy pocas investigaciones que aborden su uso.

Según Mestanza (2019) la cáscara del plátano es un residuo que sirve como material base para la elaboración de bioabsorbentes con capacidad de remover contaminantes de las aguas residuales de la industria de la curtiembre, como es el Cromo VI, mediante un proceso de lavado, secado, triturado y tamizado, obteniendo un polvo que posteriormente se utiliza en un sistema sólido- líquido (Hernández *et al.*, 2019), así mismo el tallo de palma (Trujillo *et al.*, 2021).

Según lo descrito por Sklivaniotis *et al.* (2023) las raicillas gastadas de cereal es uno de los materiales con capacidad de eliminación de cloro, seguido del grano de oliva, afirmando que la utilización de biochar a partir de estos residuos pueden ser una opción viable y económica para la creación de materiales que permitan la eliminación del cloro en el agua y aguas residuales. La cascarilla de arroz es una alternativa de absorbente eficaz para la remoción de Cr (VI) (Lozano, 2020). Por otra parte, en la industria textil se utilizan grandes cantidades de colorantes provocando aguas residuales contaminadas. Según Martínez *et al.* (2023) el bagazo de la caña de azúcar y la cáscara de naranja tienen una absorción considerable para su uso en aplicaciones industriales; así mismo, el biochar del bagazo y la cascarilla de café (Urrego & Godoy, 2021) son eficientes para la remoción del azul de metileno, mientras que el carbón activado de la cáscara de naranja es más efectivo para el naranja de metilo. Las biomásas lignocelulósicas de mijo, cascarilla de arroz y corteza de nogal negro han demostrado altos niveles de eficiencia en la remoción de Pb (II) y Ni (II) (Tejada *et al.*, 2021).

Biofertilizantes

Dentro de aplicabilidad de los desechos agroindustriales como fertilizantes se destaca la paja de arroz, como un subproducto resultante en el cultivo de arroz que mayormente es usado como alimento para animales o desechado en los campos continuando con su degradación o en el peor de los casos eliminada en procesos de quemas (Bhattacharyya *et al.*, 2020). En los ensayos realizados por Saini *et al.* 2023, la paja de arroz evidencia la presencia del contenido de macronutrientes NPK, mostrando las propiedades de un fertilizante de distribución comercial. Por otro lado, en residuos

producto de la agroindustria de la palma de aceite, se ha identificado en los racimos de los frutos de esta planta, macronutrientes como el C,H,N,S, O y P en porcentajes hasta del 48,9%, 7,86%, 1,82%, 2,21% y 2,03% respectivamente. Con micronutrientes como el Cu, B, Zn, Mn y Fe representados con 26,10,71,88,210 mg/Kg para cada uno de estos, residuos con potencial uso para fertilización en sinergia con los microorganismos promotores del crecimiento vegetal y la investigación de sus características para la mejora de sus rutas biológicas en la producción de estos nuevos biofertilizantes (Mahmud y Chong, 2021). En este mismo aspecto los residuos de la mazorca de maíz a través de procesos de fotofermentación fueron analizados por Zhang *et al.* 2023, demostrándose porcentajes de NRA (Actividad de nitrato reductasa) del 68,76% con un FDF (Colocación profunda de fertilizantes) con capacidad de liberación lenta de N.

Tableros aglomerados

Se ha reportado que se ha usado fibra de raquis de la palma africana mediante el proceso de termocompresión para la fabricación de tableros autoadheridos, y han propuesto el uso del bagazo de la caña de azúcar para la elaboración de tableros aglomerados híbridos. Así mismo, se han empleado los residuos de cáscara de mazorca de cacao debido a sus altos contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa, sin embargo, por su alta capacidad de absorción de humedad, los autores recomiendan realizar un pretratamiento de secado a los residuos y así evitar el hinchamiento del aglomerado (Díaz *et al.*, 2022). Otro subproducto empleado en esta producción es la cascarilla de arroz, documentada como residuo utilizado para la elaboración de estos (Lozano, 2020).

Nanomateriales

La posibilidad de aprovechar la biomasa lignocelulósica para la producción de nanomateriales representa una gran oportunidad para el desarrollo de la nanotecnología, despertando el interés los últimos veinte años por aquellos derivados de la celulosa debido a sus propiedades físicas y químicas como lo es la elevada resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, baja densidad, alta superficie específica y superficies reactivas, además, caracterizando estos nanomateriales por su capacidad de renovación y biodegradabilidad, los cuales pueden ser aplicados en materiales electroconductores, ópticos y biomédicos (Du *et al.*, 2019). Se han preparado nanomateriales como los nanocristales de celulosa (1–50 nm) mediante hidrólisis ácida fuerte y para su producción se han empleado residuos agrícolas como la médula del bagazo de la caña de azúcar, el orujo de uva, residuos de corona de piña, cascarilla de arroz, raquis de plátano, hierba norteafricana, la vaina de la hoja de la palma real y fibras de algodón y eucalipto (Hafemman *et al.*, 2019). Por otra parte, los puntos de carbono (CD), los cuales son nanomateriales de carbono cristalino,

3 con geometría cuasiesférica y fluorescente, con alta estabilidad y biocompatibilidad, con tamaño comprendido entre 1- 10 nm, que dependiendo su grado de cristalinidad contienen moléculas de carbono SP³ y SP² en su estructura. De manera interesante, los CD pueden obtenerse no sólo a partir de moléculas puras, sino también de biomasa vegetal sintetizados mediante ultrasonidos, oxidación química, carbonización, procesos solvotérmicos e hidrotérmicos y con aplicabilidad en campos biomédicos como la bioimagen, biodetección, la luminiscencia electroquímica y los fotosensibilizadores. Los precursores de carbono utilizados para sintetizar los CD pueden ser café molido, frutas, verduras, hojas de té y desechos agroindustriales de la yerba mate, semillas de aguacate y cáscaras de naranja (Monje *et al.*, 2021; Jing *et al.*, 2023). Se han implementado métodos de producción verde mediante el uso de biomasa y materiales de desecho como fuente de carbono para la síntesis de grafeno, el cual es una lámina que consiste en átomos de carbono dispuestos en enlaces sp² de forma hexagonal y que tiene un grosor de solo un átomo, conocido como “material del futuro” y ha sido sintetizado a partir de cascarilla de arroz (Ismail *et al.*, 2019). Sumado a esto, se tiene que el interés en la utilización de recursos renovables y biomasa también se ha inclinado por la síntesis de nanopartículas biogénicas por lo que han demostrado que poseen un potencial para ofrecer soluciones a desafíos agrícolas como la disminución del rendimiento de los cultivos provocados por factores de estrés bióticos y abióticos, falta de nutrientes y contaminación ambiental. Se han realizado investigaciones sobre la producción de nanopartículas de plata (AgNPs) usando la cubierta de la semilla de pistacho, residuos de trigo demostrando una acción estimulante de crecimiento debido al aumento del contenido de clorofila y carotenoides (Tolisano y Del Buono, 2023).

Conclusiones

La práctica de la reincorporación de los residuos agroindustriales en la elaboración de biomateriales se encamina a la consolidación de una economía circular que se base en el aprovechamiento del material orgánico desechado como fuente de materia prima en la producción de materiales de importancia en los diferentes sectores de la economía. Es de resaltar que aun con la existencia de estos biomateriales y el uso en general de los residuos agroindustriales, el transitar en la utilización de éstos y sus potenciales en aplicabilidad, requiere el avance en materia de investigación e innovación en el área, como un ejercicio de exploración hacia nuevas alternativas. Además del accionar y la cohesión con los sectores agroindustriales, económicos y el mismo territorio, en miras de la adopción de una circularidad en los procesos de producción que conduzca al desarrollo y beneficio de todas las partes involucradas.

Referencias

- Abdelraof, M., Farag, M. M., Al-Rashidy, Z. M., Ahmed, H. Y. A., El-Saied, H., & Hasanin, M. S. (2022). Green Synthesis of Bioactive Hydroxyapatite/Cellulose Composites from Food Industrial Wastes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(12), 4614–4626. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02462-2>
- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Sultan, M. T. H., Alkbir, M. F. M., Sulaiman, S., Harussani, M. M., & Bayraktar, E. (2022). Recent Developments in Cassava (*Manihot esculenta*) Based Biocomposites and Their Potential Industrial Applications: A Comprehensive Review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15196992>
- Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1(27), 5–11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>
- Alcivar, M. G., Carrillo, K. L., & Rieral, M. A. (2022). Development of a Bioplastic from Banana Peel. *Ingeniería e Investigación*, 42(3). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.92768>
- Alvarado, M., Cevallos, M., Alcívar, J., Dueñas, E., & Riera, M. (2021). RESIDUOS DEL BANANO (*Musa paradisiaca*) como materia prima alternativa en la elaboración de papel. *Revista Colón, Ciencias, Tecnología y Negocios*, 8(1), 35–46. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v8n1a3>
- Astudillo, Á., Rubilar, O., Briceño, G., Diez, M. C., & Schalchli, H. (2023). Advances in Agroindustrial Waste as a Substrate for Obtaining Eco-Friendly Microbial Products. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15043467>
- Bernal, A. & C. L. (2019). *Evaluación de un biocomposito elaborado con residuos agroindustriales del cultivo de arroz (cascarilla y tamo) y su potencial aplicación en viviendas de interés social, Paz de Ariporo, Casanare*.
- <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2141> Bhattacharyya, P., Bhaduri, D., Adak, T., Munda, S., Satapathy, B. S., Dash, P. K., Padhy, S. R., Pattanayak, A., Routray, S., Chakraborti, M., Baig, M. J., Mukherjee, A. K., Nayak, A. K., & Pathak, H. (2020). Characterization of rice straw from major cultivars for best alternative industrial uses to cutoff the menace of straw burning. *Industrial Crops and Products*, 143, 111919. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111919>
- Camerini, F. V., Chanin, C. do A., Borba, C. M., Costa, J. A. V., Burkert, C. A. V., & Burkert, J. F. de M. (2019). Biosurfactant production by *Phialemonium* sp. using agroindustrial wastes: Influence of culture conditions. *Acta Scientiarum—Biological Sciences*, 41(1). <https://doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v41i1.43484>
- Castaño, H. (2020). *EMPAQUES SOSTENIBLES: Aprovechamiento de residuos agroindustriales para disminuir los empaques plásticos de un solo uso*. <http://repositorio.itm.edu.co/browse?type=dateissued>
- Castillo, G., Chavarry, J., Peralta, J., & Muñoz, S. (2021). Uso de residuos agroindustriales en las propiedades mecánicas del concreto: Una revisión literaria. *Revista Ingeniería*, 5(13), 123–142. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v5i13.86>
- Chávez, E., Aguillón, J., Sánchez, A., & Siebe, C. (2020). Characterization of untreated and composted biochar derived from orange and pineapple peels. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 413–427. <https://doi.org/10.20937/RICA>

- 53591Chicaiza, L., & Robles, J. (2021). Proposal for a circular economy for the recovery of value from fruit waste in packaging manufacturing. *DYNA (Colombia)*, 88(217), 140–149. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.91850>
- Cisneros, M., García, J., Mora, J., Martínez, M., García, R., Valdez, J., & Portillo, M. (2020). EVALUACIÓN ECONÓMICA CON OPCIONES REALES: BIOREFINERÍA DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN EN VERACRUZ ECONOMIC EVALUATION WITH REAL OPTIONS: SECOND GENERATION BIOETHANOL BIOREFINERY IN VERACRUZ, MEXICO. In *Publicado como ARTÍCULO en ASyD* (Vol. 17). Cornejo, G., Marinero, E., Funes, C., & Toruño, P. (2020). Biopolímeros para uso agroindustrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termo plástico biodegradable. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 6(11), 1359–1382. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>
- Curbelo, C., Véliz, E., & Ameneiros, J. (2019). Alternative pretreatments of rice and tobacco wastes for the production of fermentable sugars. *Revista Facultad de Ingeniería*, 91, 24–30. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n91a-03>
- Dey, N & Bhaskarwar, A. (2021). Bioconversion of Food Waste into Ethanol: A Review. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 46). Springer Nature.
- Dias, R., Maroneze, M., de Oliverira, A., Caetano, P., Zepka, L & Jacob-Lopez, E. (2021). Bioconversion of Industrial Wastes into Biodiesel Feedstocks. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 115). Springer Nature
- Díaz, A., Ramón, B., & Moreno, G. (2022). Caracterización fisicoquímica de la cáscara de mazorca de cacao como posible uso en la elaboración de tableros aglomerados. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 12(1), 97–106. <https://doi.org/10.19053/20278306.v12.n1.2022.14211>
- Díaz, I., Ancco, M., Peña, G., Ancco, R., Davila, G., & Jiménez, H. (2022). Efectos del biocarbón obtenido a partir de residuos agrícolas de uva en la generación de biogás. *Revista de Investigaciones Altoandinas—Journal of High Andean Research*, 24(4), 278–288. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.4237>
- Du, H., Liu, W., Zhang, M., Si, C., Zhang, X., & Li, B. (2019). Cellulose nanocrystals and cellulose nano fibrils based hydrogels for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 209, 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.020>
- Enriquez, M. (2019). *Aprovechamiento de residuos industriales para la obtención de clínker*. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/CO_bb36e0954bba0a-4f7de2b01888764c70
- Famiglietti, M., Zannini, D., Turco, R., & Mariniello, L. (2023). Mechanical, Barrier and Thermal Properties of Amylose-Argan Proteins-Based Bioplastics in the Presence of Transglutaminase. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4). <https://doi.org/10.3390/ijms24043405>
- Fontes, A. V. P., João, I. M., & Silva, J. M. (2021). Multicriteria evaluation of biomass residues in Portugal to second generation bioethanol production. *Production*, 31, 1–14. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210060>

- Francisco, B., Vidal, isamar, Maldonado, Y., Jiménez, J., Flores, V., Arámbula, G., & Salazar, R. (2021). Efecto de la adición de subproductos agroindustriales en las propiedades físicas de un biopolímero almidón-gelatina. *Biotecnia*, 23(1), 52–61. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.1324>
- Gaitán, S., Restrepo, L., Parada, F., & Narváez, C. (2022). Cashew (*Anacardium occidentale*) Nut-Shell Liquid as Antioxidant in Bulk Soybean Oil. *Molecules*, 27(24). <https://doi.org/10.3390/molecules27248733>
- Gómez, J., Sánchez, Ó., & Matallana, L. (2019). Urban, Agricultural and Livestock Residues in the Context of Biorefineries. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 7–32. <https://doi.org/10.19053/01211129.V28.N53.2019.9705>
- Gutiérrez, A., De Lira, J., Quiroz, E., & Martínez, G. (2020). Conversión de residuos agroindustriales para la generación de biocombustibles, productor de valor agregado y bioenergía. *Digital Ciencia@UAQRO*, 3(4), 27–35. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/41>
- Hafemann, E., Battisti, R., Marangoni, C., & Machado, R. A. (2019). Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydrate polymers*, 218, 188-198. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.086>
- Hernández, L., Majano, G., & Mira, E. (2019). *Elaboración de un material biosorbente a partir de cáscara de plátano (Musa sp.) para ser utilizado en la remoción de Cromo VI proveniente de las aguas residuales de la industria curtiembre*. <https://core.ac.uk/download/pdf/275580232.pdf>
- Herrera, J., Villa, L., Olaya, A., & García, L. (2020). Extracción de almidón de cáscara de cacao *Theobroma cacao* L. como alternativa de bioprospección. *Revista ION*, 33(2), 25–34. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020002>
- Ismail, M. S., Yusof, N., Yusop, M. Z. M., Ismail, A. F., Jaafar, J., Aziz, F., & Karim, Z. A. (2019). Synthesis and characterization of graphene derived from rice husks. *Malays. J. Fundam. Appl. Sci*, 15, 516-521.
- Jing, H. H., Bardakci, F., Akgöl, S., Kusat, K., Adnan, M., Alam, M. J., & Sasidharan, S. (2023). Green Carbon Dots: Synthesis, Characterization, Properties and Biomedical Applications. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(1), 27. <https://doi.org/10.3390/jfb14010027>
- Khatiwada, J., Shrestha, S., Sharma, H & Qin, J. (2021). Bioconversion of Hemicelluloses into Hydrogen. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 268). Springer Nature.
- López, L., Vega, L., Rendón, C., & Tobón, S. (2021). Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 104–124. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1>
- Lozano, C. (2020). *Alternativas de usos de la cascarilla de arroz (Oriza sativa) en Colombia para el mejoramiento del sector productivo y la industria*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33698>

- Madrid, J., Mendoza, D., & Fontalvo, M. (2021). Producción de biodiesel a partir del aceite extraído de almendra del corozo *Bactris guineensis* asistida mediante ultrasonido de sonda directa. *Tecnura*, 25(69), 51–75. <https://doi.org/10.14483/22487638.15809>
- Mahmud, M. S., & Chong, K. P. (2021). Formulation of biofertilizers from oil palm empty fruit bunches and plant growth-promoting microbes: A comprehensive and novel approach towards plant health. *Journal of King Saud University–Science*, 33(8), 101647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101647>
- Maldonado, A., Maldonado, J., Yela, R., & Moreno, E. (2022). Circular economy and its impact on environmental sustainability. *Centro Sur*. <https://doi.org/10.37955/cs.v6i3.275>
- Martínez, R. J., Vela-Carrillo, A. Z., Godínez, L. A., Pérez-Bueno, J. de J., & Robles, I. (2023). Competitive adsorption of anionic and cationic molecules on three activated carbons derived from agroindustrial waste. *Biomass and Bioenergy*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106660>
- Mehmood, T., Nadeen, F., Qamar, S., Bilal, M & Iqbal, H. (2021). Bioconversion of Agro-Industrial Waste into Value-Added Compounds. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 358). Springer Nature.
- Mejía, A., & Cuty, E. (2019). Influencia del biodiésel de aceite de fritura usado, sobre las emisiones: índice de opacidad. *Tecnura*, 23(59), 60–67. <https://doi.org/10.14483/22487638.13722>
- Monje, D. S., Chacon, K. M., Galindo, I. C., Castaño, C., Ballesteros-Rueda, L. M., Valencia, G. C., & Mercado, D. F. (2021). Carbon dots from agroindustrial residues: a critical comparison of the effect of physicochemical properties on their performance as photocatalyst and emulsion stabilizer. *Materials Today Chemistry*, 20, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100445>
- Mora, J., Aguilar, F., Carballo, A., Vega, J., Trimino, H., Villegas, L., Stöbener, A., Eixenberger, D., Bubenheim, P., Sandoval, M., & Liese, A. (2023). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part I: coffee and palm oil by-products. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 13, Issue 2, pp. 1469–1487). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01442-9>
- Morales, M. A., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2023). Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym15030528>
- Muñoz Pérez, S. P., Delgado Sánchez, J. L., & Facundo Peña, L. E. (2021). Elaboración de ladrillos ecológicos en muros no estructurales: una revisión. *Cultura Científica y Tecnológica*, 18(1), 1–9. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2021.1.3.1>
- Murcia, J., Ardila, A., & Barrera, R. (2020). Producción de etanol a partir de piñas de rechazo de cultivos del Chocó. *Revista ION*, 33(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020005>
- Ordoñez, K., & Sepúlveda, C. (2019). *Caracterización físico química de los residuos del plátano y el café para su posible uso como materias primas en la fabricación del papel*.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (04 de abril de 2023). *Biotecnología agrícola en la agricultura, la silvicultura, la ganadería, la pesca y la agroindustria*. <https://www.fao.org/biotech/sectoral-overviews/agro-industry/es/#:~:text=Las%20agroindustrias%20constituyen%20un%20medio,en%20los%20pa%C3%ADses%20en%20desarrollo>.
- Palve, A., Arukula, R., & Gupta, R. (2021). Bioconversion of biowastes for energy applications. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (pp 1-13). Springer Nature.
- Pérez, C., Juárez, P., Anzaldo, J., Alia, I., Salcedo, E., Guillén, D., Balois, R., López, V., & Castro, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*, 39, 1–11. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.936>
- Preciado, A., Canizales, J., Villegas, M., Domínguez, J. A., & González, G. (2022). Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(2), 92–99.
- Reshmy, R., Philip, E., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Balakumaran, P & Pandey, A. (2021). Potential Utilisation of Fruit and Vegetable Waste: An Overview. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 187). Springer Nature.
- Reyes, Y., Arteaga, M., Morejón, Y., & Fuentes, A. (2020). Valoración del potencial energético de los residuos agroindustriales de tomate para su empleo como biocombustible. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(2), 37–44. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28326.32325>
- Saini, S., Kuhad, R. C., & Sharma, K. K. (2023). Valorization of rice straw biomass for co-production of bioethanol, biopesticide and biofertilizer following an eco-friendly biorefinery process. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.044>
- Sierra, E., Vargas, A., Moss, C., Trujillo, B., Molina, E., Rosas, A., Valdivia, Á., Hernández, M., Vivaldo, E., & Martínez, A. (2022). Co-Fermentation of Glucose–Xylose Mixtures from Agroindustrial Residues by Ethanologenic *Escherichia coli*: A Study on the Lack of Carbon Catabolite Repression in Strain MS04. *Molecules*, 27(24). <https://doi.org/10.3390/molecules27248941>
- Sharma, K., Toor, S., Shah, A & Rosendahl, L. (2021). Green and sustainable biomass processing for fuels and chemicals. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 23). Springer Nature.
- Shrestha, S., Khatiwada, J., Sharma, H & Qin, W. (2021). Bioconversion of Fruits and Vegetables Wastes into Value-Added Products. En Inamuddin & Khan, A (Eds.). *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products* (p 150). Springer Nature.

- Sklivaniotis, L. N., Economou, P., Karapanagioti, H. K., & Manariotis, I. D. (2023). Chlorine Removal from Water by Biochar Derived from Various Food Waste Natural Materials. *Environmental Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00617-4>
- Tejada, C., Villabona, Á., Sierra, C., Meza, M., & Ortega, R. (2021). Adsorption in a binary system of Pb (II) and Ni (II) using lemon peels. *Revista Facultad de Ingeniería*, 101, 31–44. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.202006917>
- Tolisano, C., & Del Buono, D. (2023). Biobased: Biostimulants and biogenic nanoparticles enter the scene. *Science of The Total Environment*, 885, 163912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163912>
- Urrego, W., & Godoy, M. (2021). Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica. *Prospectiva*, 19(2). <https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2590>
- Zhang, Z., Ai, F., Li, Y., Zhu, S., Wu, Q., Duan, Z., Liu, H., Qian, L., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2023). Co-production process optimization and carbon footprint analysis of biohydrogen and biofertilizer from corncob by photo-fermentation. *Bioresource Technology*, 375, 128814. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128814>