

Valorización de residuos agroindustriales y desperdicio de alimentos: una revisión desde la economía circular y la biotecnología aplicada

Valorization of Agro-Industrial Residues and Food Waste: A Review from a Circular Economy and Applied Biotechnology Approach

Heidi M. Palma-Rodríguez ^a, Alejandra Flores-Castro ^b, José A. Román-Brito ^b,
Laura Sánchez-Hernández ^b, Walter D. Pineda-Cruz ^b, Rubí G. Utrilla-Coello ^{b*}

Abstract:

Food waste and agro-industrial residues represent one of the most critical global challenges for environmental, social, and economic sustainability. In 2022, more than one billion tons of food waste were generated worldwide, together with large volumes of lignocellulosic residues from agro-industrial activities. These waste streams contribute significantly to greenhouse gas emissions and environmental pollution; however, they also constitute a strategic opportunity within circular economic frameworks. This review article analyzes the global scale of food waste and agro-industrial residues, examines the main valorization pathways, including animal feed, bioremediation, and biotechnological production of high-value products, and discusses the technical, economic, and regulatory challenges for large-scale implementation. In addition, the role of public-private partnerships as a key mechanism to promote sustainable agri-food systems is highlighted.

Keywords:

Agro-industrial residues; food waste; circular economy; biotechnological valorization; sustainability.

Resumen:

El desperdicio de alimentos y los residuos agroindustriales constituyen uno de los principales retos globales para la sostenibilidad ambiental, social y económica. En 2022, se generaron más de mil millones de toneladas de desperdicio de alimentos a nivel mundial, acompañadas de grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos provenientes de la agroindustria. Estos flujos contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la contaminación ambiental. No obstante, representan una oportunidad estratégica para su aprovechamiento conforme a los principios de la economía circular. El presente artículo de revisión analiza la magnitud global del problema, describe las principales vías de valorización de residuos agroindustriales y del desperdicio de alimentos, incluyendo la alimentación animal, la biorremediación y la producción biotecnológica de productos de alto valor, y discute los desafíos técnicos, económicos y regulatorios para su implementación a escala. Asimismo, se destaca el papel de las asociaciones público-privadas como un mecanismo clave para impulsar la transición hacia sistemas agroalimentarios más sostenibles.

Palabras Clave:

Residuos agroindustriales; desperdicio de alimentos; economía circular; valorización biotecnológica; sostenibilidad.

1. Introducción

El desperdicio de alimentos y la generación de residuos agroindustriales representan una problemática global de creciente relevancia. De acuerdo con estimaciones recientes, más de mil

millones de toneladas de alimentos se desperdiciaron en 2022, lo que equivale a aproximadamente 132 kg por habitante a nivel mundial [1]. La distribución de este desperdicio por sector se presenta en la Tabla 1.

^a Universidad Autónoma de Hidalgo, Tulancingo-Hidalgo México, <https://orcid.org/0000-0001-7174-2747>, email: heidi_palma9518@uaeh.edu.mx

^b Tecnológico Nacional de México, Campus Acapulco, Acapulco-Guerrero, México, <https://orcid.org/0009-0006-3105-6121>, email: alejandra.fc@acapulco.tecnm.mx; <https://orcid.org/0000-0001-5454-7835>, email: jose.rb@acapulco.tecnm.mx; <https://orcid.org/0009-0003-8966-4654>, email: jose.rb@acapulco.tecnm.mx; <https://orcid.org/0009-0008-3965-9802>, email: walter.dcp10@gmail.com

*Autor por correspondencia: <https://orcid.org/0000-0002-5769-7449>, email: rubi.uc@acapulco.tecnm.mx

Tabla 1. Estimaciones del desperdicio mundial de alimentos en 2022

Sector	Desperdicio total (toneladas)	Porcentaje del total
Hogares	631 millones	60%
Servicios Alimentarios	309 millones	28%
Comercio Minorista	138 millones	12%
Total	1.05 mil millones	100%

Fuente: [1].

Este fenómeno implica no solo una pérdida significativa de recursos naturales, energéticos y económicos, sino también una contribución estimada del 8 al 10 % a las emisiones antropogénicas globales de gases de efecto invernadero [2].

De manera paralela, la agroindustria genera grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos, como cáscaras, bagazo, paja y rastrojos, cuya disposición inadecuada incrementa los impactos ambientales negativos. Sin embargo, estos residuos poseen una composición rica en celulosa y hemicelulosa, lo que los convierte en una materia prima con un alto potencial de aprovechamiento. En este contexto, la economía circular emerge como un enfoque estratégico para transformar residuos en recursos, cerrar ciclos productivos y generar valor agregado [3]. Entre las principales vías de valorización se encuentran el uso de dichos residuos en la alimentación animal, su aplicación como materiales adsorbentes en procesos de biorremediación y tratamiento de aguas residuales, su transformación mediante procesos biotecnológicos y fermentativos para la obtención de productos de alto valor agregado, como enzimas, bioplásticos, biofertilizantes y biocombustibles, así como su empleo como materia prima para la producción de compuestos funcionales y bioactivos. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es analizar la evidencia científica disponible sobre la magnitud del desperdicio de alimentos y la generación de residuos agroindustriales, así como sus principales vías de valorización mediante enfoques de economía circular y de biotecnología aplicada, con el fin de identificar oportunidades y desafíos para el desarrollo de sistemas agroalimentarios más sostenibles. Escala global del desperdicio de alimentos y residuos agroindustriales

El Índice de Desperdicio de Alimentos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente distingue entre pérdida de alimentos,

que ocurre desde la postcosecha hasta antes del comercio minorista, y el desperdicio de alimentos, asociado principalmente a hogares, servicios alimentarios y al comercio minorista. En 2022, los hogares concentraron alrededor del 60 % del desperdicio global, seguidos por los servicios alimentarios (28 %) y el comercio minorista (12 %) [1].

Un hallazgo relevante es que el desperdicio per cápita en los hogares presenta valores similares entre países de ingresos altos, medios y bajos, lo que demuestra que se trata de un desafío universal. Este escenario refuerza la necesidad de estrategias integrales que aborden tanto la prevención como la valorización de los residuos generados a lo largo de la cadena agroalimentaria. Los residuos agroindustriales se generan tanto a partir del consumo directo de productos primarios como de los procesos de industrialización, que abarcan desde la cosecha o la crianza hasta la obtención del producto final. Se ha reportado que la industria agroalimentaria es responsable de la mayor proporción de residuos generados (44 %), en comparación con otros sectores industriales como el textil o el de la construcción [4].

En México se generan aproximadamente 20 millones de toneladas de residuos provenientes de la agroindustria azucarera, así como de los sectores del maíz, trigo, cacao y plátano [5]. Estos residuos se caracterizan por su alto contenido de polisacáridos estructurales, como almidón, celulosa y hemicelulosa, además de diversos compuestos bioactivos, entre los que se incluyen compuestos fenólicos, ácidos orgánicos y aceites esenciales [6]. Debido a su composición química, estos materiales presentan un alto potencial de aprovechamiento o transformación mediante procesos biotecnológicos, lo que permite obtener productos de valor económico y reduce su impacto ambiental al evitar que se conviertan en fuentes de contaminación.

2. Principales vías de valorización de residuos agroindustriales

2.1 Alimentación animal sostenible

El uso de residuos agrícolas y subproductos agroindustriales como insumos para la alimentación animal constituye una alternativa rentable y ambientalmente favorable. Residuos como rastrojo de cereales, bagazo de caña de azúcar, bagazo de frutas y bagazo cervecero pueden emplearse como fuentes de fibra, reduciendo la dependencia de piensos convencionales [7]. Los rumiantes poseen una ventaja

fisiológica particular debido a la presencia del rumen, un ecosistema microbiano especializado capaz de degradar polisacáridos complejos, como la celulosa y la hemicelulosa, presentes en residuos agrícolas y subproductos vegetales no comestibles para los humanos. Durante la fermentación ruminal, los microorganismos convierten la fibra vegetal en ácidos grasos volátiles, la principal fuente de energía metabólica, y en biomasa microbiana, que aporta proteína de alta calidad y aminoácidos esenciales absorbidos a nivel intestinal. Este mecanismo permite transformar biomasa de bajo valor nutricional en productos de alto valor biológico como carne y leche, mediante rutas microbianas que integran fermentación y síntesis proteica microbiana [8].

No obstante, muchos residuos agroindustriales presentan bajo contenido proteico o contienen factores antinutricionales, por lo que requieren pretratamientos físicos, químicos o biológicos para mejorar su digestibilidad y valor nutritivo. Diversos estudios han evaluado el uso de enzimas exógenas y bacterias para incrementar la digestión de estos residuos, caracterizados por un alto contenido de fibra lignocelulósica de baja digestibilidad, lo que limita su uso como alimento directo. La variabilidad en las respuestas productivas observadas en animales puede atribuirse a factores asociados a las características de las enzimas, el tipo y madurez del forraje, la especie y edad del animal, así como al manejo y modo de aplicación de los tratamientos enzimáticos [9].

Otra alternativa es la combinación con otras fuentes ricas en proteína, como las leguminosas que permite mejorar significativamente el perfil nutricional de la dieta, y cubrir los requerimientos de aminoácidos esenciales contribuyendo a mejorar el rendimiento productivo del ganado y reducir la huella ambiental de los sistemas pecuarios [10].

Además de los beneficios nutricionales que aporta el uso de residuos agrícolas en la alimentación de rumiantes, esta práctica puede contribuir significativamente a mitigar el impacto ambiental de los sistemas pecuarios. Durante la fermentación entérica, los rumiantes producen metano como subproducto metabólico; sin embargo, diversos estudios han demostrado que dietas basadas en residuos de cultivos ricos en fibra lignocelulósica pueden modificar los patrones fermentativos del rumen y reducir las emisiones de metano entre un 10 y un 20 % cuando se emplean de forma adecuada [11]. Adicionalmente, el aprovechamiento de residuos agrícolas como alimento animal disminuye la necesidad de su quema en campo, una práctica común en diversos países y responsable de importantes emisiones de gases de efecto invernadero. En México, se estima que la quema de residuos agrícolas, como el rastrojo de maíz, alcanza aproximadamente 4.1 millones de

toneladas anuales, lo que libera alrededor de 7.2 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, además de emisiones de metano y partículas finas, por lo que su valorización como insumo pecuario permite una reducción directa de estas emisiones y contribuye a la mitigación del cambio climático [2].

Asimismo, la sustitución parcial de insumos convencionales, como el maíz y la harina de soya, por residuos agrícolas reduce la presión sobre los recursos naturales, ya que los cultivos destinados a la producción de piensos requieren grandes cantidades de tierra, agua y fertilizantes. Se ha reportado que la producción de piensos representa más del 90 % de la huella hídrica de los productos pecuarios, y que la obtención de un kilogramo de harina de soya puede requerir hasta 2 100 L de agua, mientras que los residuos agrícolas son subproductos que no requieren insumos adicionales, lo que permite disminuir de manera significativa la huella hídrica y la contaminación asociada al uso excesivo de fertilizantes [2].

No obstante, el uso de residuos agroindustriales en la alimentación animal conlleva limitaciones sanitarias y regulatorias. Se ha documentado que el empleo de residuos contaminados puede incrementar la presencia de agentes que afectan la salud animal y la seguridad de los productos derivados [12]. Asimismo, prácticas inadecuadas de fermentación o almacenamiento pueden favorecer la formación de micotoxinas y otras toxinas microbianas, las cuales reducen la digestibilidad de los nutrientes y representan riesgos sanitarios para los animales [13]. Desde la perspectiva regulatoria, existen normativas estrictas que definen los ingredientes permitidos, los límites máximos de contaminantes y los requisitos de calidad para los piensos, lo que implica procesos de certificación, análisis de riesgo y cumplimiento continuo de estándares, constituyendo barreras para su adopción generalizada [14].

2.2 Biorremediación y tratamiento de aguas residuales

La biorremediación mediante procesos de adsorción se ha consolidado como una alternativa sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. Diversos residuos de origen biológico y agroindustrial presentan propiedades adsorbentes capaces de remover cationes metálicos de soluciones acuosas, entre los que destacan el aserrín, la cáscara de arroz, los residuos de té y café, la cáscara de naranja, la cáscara de cacahuete, hojas y cortezas secas, así como el carbón activado derivado de biomasa [15,16]. La adsorción de metales ocurre principalmente mediante mecanismos fisicoquímicos, como el intercambio iónico y la formación de complejos entre iones metálicos y grupos funcionales (hidroxilo, carboxilo y amino) presentes en la superficie de la biomasa.

Asimismo, las propiedades estructurales del adsorbente, particularmente la porosidad, el área superficial y las características químicas de la superficie, determinan tanto la capacidad como la velocidad del proceso, siendo factores clave para el diseño de sistemas de tratamiento [17].

Se ha reportado el uso eficiente de residuos agroindustriales, como cáscara de papa, coco, naranja, caparazones de crustáceos y café, para la remoción de contaminantes presentes en efluentes industriales, destacando ventajas como su bajo costo, amplia disponibilidad, facilidad de operación y elevada eficiencia (Tabla 2). Estas características posicionan a la adsorción basada en residuos como una tecnología prometedora frente a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales [18].

Tabla 2. Ejemplos de capacidad de adsorción de residuos agrícolas

Adsorbente	Contaminante (Adsorbato)	Capacidad de Adsorción (mg/g)
Cáscara de naranja	Níquel (Ni(II))	158
Cáscara de plátano	Cromo (Cr(VI))	131.56
Carbón activado de coco	2,4,6-Triclorofenol	716.10
Tallo de girasol	azul de metileno	205
Salvado de trigo tratado con H ₃ PO ₄	Níquel (Ni(II))	102

Fuente: [19]

2.3 Producción biotecnológica de productos de alto valor

La valorización de residuos agroindustriales mediante herramientas biotecnológicas constituye una estrategia clave para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles y alineados con los principios de la economía circular. La bioconversión de estos residuos a través de procesos como la fermentación microbiana permite transformar materiales abundantes y de bajo costo en productos de alto valor agregado con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y energética [6].

Los residuos agroindustriales constituyen sustratos adecuados para el crecimiento microbiano y la síntesis de compuestos de interés industrial debido a su composición rica en azúcares fermentables, compuestos bioactivos y nutrientes esenciales. En este contexto, los procesos fermentativos pueden desarrollarse mediante fermentación en estado sólido, donde el microorganismo crece sobre un

sustrato húmedo con mínima fase líquida, o mediante fermentación sumergida, en sistemas líquidos controlados en biorreactores. En ambos casos, parámetros como el pH, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y la producción de CO₂ son determinantes para optimizar el rendimiento del proceso [20].

La fermentación microbiana, tanto en estado sólido como en estado sumergido, constituye la ruta biotecnológica más versátil y ampliamente aplicada. Los residuos de yuca, bagazo de caña, cáscaras de cítricos y bagazo cervecero se han empleado exitosamente como sustratos ricos en carbono y nutrientes para la producción de biosurfactantes, ácidos orgánicos, enzimas, biopolímeros y proteínas microbianas. Dentro de los procesos biotecnológicos, aquellos orientados a la producción energética, como la digestión anaerobia para la obtención de biogás y la fermentación alcohólica para bioetanol, permiten manejar grandes volúmenes de residuos y contribuyen de manera significativa a la mitigación ambiental; sin embargo, suelen presentar menor rentabilidad por unidad de masa procesada. En contraste, los procesos dirigidos a la obtención de productos de alto valor agregado, como biosurfactantes, enzimas especializadas, xilitol, ácido láctico, ácido cítrico, bioplásticos y nanocelulosa, requieren condiciones de operación más controladas, pero ofrecen mayor valor económico, aplicaciones industriales diversificadas y un mayor interés en términos de protección por propiedad intelectual [21].

A través de estas tecnologías se ha logrado producir una amplia variedad de biomoléculas de interés, incluyendo bioetanol, enzimas industriales, biopolímeros, antioxidantes, vitaminas, proteínas unicelulares y metabolitos secundarios, lo que contribuye tanto a la reducción del impacto ambiental como al aprovechamiento eficiente de los recursos. Asimismo, la integración de residuos agroindustriales en procesos biotecnológicos favorece la generación de nuevos modelos de negocio, impulsa el desarrollo regional y fortalece las políticas de bioeconomía, particularmente en regiones con alta actividad agrícola [6,20]. La tabla 3 ofrece una síntesis de los principales residuos, destacando los productos generados, los procesos biotecnológicos y los microorganismos involucrados en su valorización.

Tabla 3. Potencial Biotecnológico de Diversos Residuos Agroindustriales

Residuo	Productos de valor agregado	Microorganismos/Procesos involucrados
Yuca (manipueira, bagazo)	Biosurfactantes, biogás (metano), bioetanol, biohidrógeno	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , digestión anaeróbica
Naranja (cáscara, pulpa)	Xilitol, ácido cítrico, pectina, goma xantana, aceites esenciales	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , fermentación en estado sólido
Caña de Azúcar (bagazo)	Ácido láctico, xilitol, enzimas (celulasas), bioetanol, nanocelulosa	<i>Bacillus sp.</i> , <i>Wickerhamomyces anomalus</i> , fermentación
Cervecería (bagazo de malta)	Pectinasa, biocarbón, biosorbentes para fármacos (paracetamol)	<i>Pleurotus djamore</i> , <i>Hypsizygos ulmarius</i> , pirólisis, adsorción
Lácteo (suero/lactosuero)	Péptidos bioactivos (antioxidantes, antihipertensivos), lactulosa (prebiótico)	Hidrólisis enzimática (tripsina, quimotripsina), isomerización de lactosa
Café (cáscara, pulpa, borra)	Compuestos bioactivos (fenoles, cafeína), bioenergía (biogás, briquetas), fertilizantes orgánicos, bioplásticos	Extracción, digestión anaeróbica, compostaje

Fuente: [22-23]

3. Desafíos para la implementación a escala

A pesar del amplio potencial de valorización identificado, la implementación a escala industrial enfrenta desafíos técnicos, económicos y regulatorios. Entre los principales obstáculos se encuentran la variabilidad en la composición de los

residuos agroindustriales que dificultan la estandarización de los procesos; los costos asociados a la infraestructura y al escalamiento tecnológico; y la logística requerida para la recolección, el almacenamiento y el transporte de residuos dispersos geográficamente.

Asimismo, la ausencia de marcos regulatorios claros y armonizados, en particular respecto del uso de residuos en aplicaciones alimentarias, pecuarias y ambientales, limita la transferencia tecnológica y la comercialización de los productos derivados. En este contexto, las asociaciones público-privadas se perfilan como un mecanismo estratégico para fortalecer la medición del desperdicio de alimentos, reducir riesgos económicos y facilitar la integración de los procesos de valorización en las cadenas productivas.

4. Conclusiones

La revisión evidencia que el desperdicio de alimentos y los residuos agroindustriales presentan un alto potencial de valorización debido a su composición rica en polisacáridos, nutrientes y compuestos bioactivos, lo que permite su transformación en insumos de valor mediante enfoques biotecnológicos y de economía circular. La fermentación microbiana, tanto en estado sólido como en estado sumergido, se identifica como la principal ruta de aprovechamiento, lo que posibilita la obtención de enzimas, ácidos orgánicos, biopolímeros, biosurfactantes y proteínas microbianas; sin embargo, la eficiencia de estos procesos está condicionada por la variabilidad en la composición de los residuos, lo que subraya la necesidad de su caracterización y pretratamiento. Asimismo, el uso de residuos agroindustriales en alimentación animal y en el tratamiento de aguas residuales contribuye a la reducción de emisiones, a la disminución de la quema en campo y a la mitigación de la huella hídrica de los sistemas agroalimentarios, siempre que se garantice un manejo adecuado que minimice riesgos sanitarios y regulatorios. En conjunto, aunque existen bases científicas y tecnológicas sólidas para su aprovechamiento, la implementación a escala continúa limitada por barreras técnicas, económicas y normativas que deben ser atendidas para consolidar modelos sostenibles de valorización

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- [1] J. M. Forbes Hamish, Peacock Eloise, Abbot Nettie, "Informe sobre el índice de desperdicio de alimentos 2024," Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi, 2024. [Online]. Available: <https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>
- [2] F. and A. O. of the U. Nations, "Food wastage footprint: Impacts on natural resources," Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2013.
- [3] B. I. S. Ratu Roxana Nicoleta, Velescu Ionut Dumitru, Stoica Florina, Usturoi Alexandru, Arsenoiaia Vlad Nicolae, Crivei Ioana Cristina, Postolache Alina Narcisa, Lips Florin Daniel, Filipov Feodor, Florea Andreea Mihaela, Chit Mihai Alexandru, "Application of Agri-Food By-Products in the Food Industry," *Agriculture*, vol. 13, p. 1559, 2023.
- [4] G. Hodaifa, E. López, M. E. Martínez, and S. Sánchez, "Agro-industrial waste as a source of bioenergy and other value-added products: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 117–130, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.160.
- [5] S. Pérez-Contreras, D. A. Avalos-de la Cruz, J. A. Herrera-Corredor, M. A. Lizardi-Jiménez, O. Baltazar-Bernal, and R. Hernandez Martínez, "Residuos agroindustriales en México: Una alternativa para la producción de enzimas de interés industrial: Valorización de residuos agroindustriales," *Agro-Divulgación*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.54767/ad.v5i1.304.
- [6] K. Marić, A. N. Grassino, Z. Zhu, F. J. Barba, M. Brnčić, and S. Rimac Brnčić, "An overview of the traditional and emerging technologies for agro-industrial waste valorization," *Processes*, vol. 6, no. 10, pp. 1–22, 2018, doi: 10.3390/pr6100196.
- [7] A. M. Shah et al., "The Vital Roles of Agricultural Crop Residues and Agro-Industrial By-Products to Support Sustainable Livestock Productivity in Subtropical Regions," pp. 1–31, 2025.
- [8] É. B. R. da Silva, "A review of the rumen microbiota and the different mechanisms underlying feed fermentation and nutrient metabolism in ruminants," *Animals*, vol. 14, no. 10, p. 1448, 2024, doi: 10.3390/ani14101448.
- [9] K. A. Beauchemin, D. Colombatto, D. P. Morgavi, and W. Z. Yang, "Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants," *J. Anim. Sci.*, vol. 81, no. E-Suppl. 2, pp. E37–E47, 2003, doi: 10.2527/2003.81suppl_2E37x.
- [10] S. Singh, B. V Bhat, G. P. Shukla, K. K. Singh, and D. Gehrana, "Variation in carbohydrate and protein fractions, energy, digestibility and mineral concentrations in stover of sorghum cultivars," *Trop. Grasslands-Forrajes Trop.*, vol. 6, no. 1, pp. 42–52, 2018, doi: 10.17138/tgft(6)42-52.
- [11] J. R. Knapp, G. L. Laur, P. A. Vadas, W. P. Weiss, and J. M. Tricarico, "Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions," *J. Dairy Sci.*, vol. 97, no. 6, pp. 3231–3261, 2014, doi: 10.3168/jds.2013-7234.
- [12] M. Malenica, S. Džidić, and D. Grbeša, "Safety challenges of using agro-industrial by-products in animal nutrition," *Animals*, vol. 12, no. 3, p. 345, 2022, doi: 10.3390/ani12030345.
- [13] L. Yafetto and S. C. Whisson, "Fungal toxins and their impact on animal health and feed safety," *Microorganisms*, vol. 11, no. 2, p. 345, 2023, doi: 10.3390/microorganisms11020345.
- [14] V. G. Papatsiros, I. Stylianaki, and E. Papapanagiotou, "Regulatory framework and safety requirements for alternative feed resources in animal nutrition," *Agriculture*, vol. 15, no. 1, p. 25, 2025, doi: 10.3390/agriculture15010025.
- [15] G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review," *Bioresour. Technol.*, vol.