



Artículo de revisión / Review article

Aprovechamiento de residuos sólidos de la agroindustria en la remoción de contaminantes, un estudio de revisión

Use of solid waste from agroindustry in the removal of contaminants, a review study

Luzbenia Analí Motta-Machicado ¹

¹Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

Recibido: 21/08/2023

Aceptado: 24/10/2023

Publicado: 30/01/2024

*Autor de correspondencia: luzbanalimotta@gmail.com

Resumen: El presente artículo de revisión fue realizado con el objetivo de compilar información del uso de residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes derivados de diversas industrias. Los desechos representan un problema de índole ambiental y económico para las empresas procesadoras y la comunidad, pero son portadores de diversos componentes con grandes potencialidades de aprovechamiento y oportunidades económicas. En tal sentido, se han identificado diversas modalidades de uso de residuos agroindustriales en la depuración de contaminantes. Esta revisión recopila la información de 12 artículos científicos originales de investigación experimental en dos campos de estudio: la depuración de metales pesados y la remoción de colorantes. Para realizar la revisión bibliográfica, se buscaron artículos científicos publicados en los últimos 10 años en las bases de datos Scielo, Dialnet y Sciencedirect; esta revisión evidencia las grandes oportunidades del uso de estos desechos en mitigar graves problemas medioambientales.

Palabras clave: desechos agroindustriales; residuos agroindustriales

Abstract: This review article was carried out with the objective of compiling information on the use of agroindustrial waste in the removal of contaminants derived from various industries. Waste represents an environmental and economic problem for processing companies and the community, but they are carriers of various components with great potential for use and economic opportunities. In this sense, various modalities of use of agroindustrial waste in the purification of contaminants have been identified. This review compiles information from 12 original scientific articles of experimental research in two fields of study: the purification of heavy metals and the removal of dyes. To carry out the bibliographic review, scientific articles published in the last 10 years were searched in the Scielo, Dialnet and Sciencedirect databases; This review shows the great opportunities of using these wastes to mitigate serious environmental problems.

Keywords: agroindustrial wastes; agroindustrial residues

1. Introducción

Actualmente, el aumento de la población mundial acompañado de la constante intervención del hombre en la naturaleza ha creado mayores demandas de bienes y servicios, un incremento considerable en la producción de desechos y un progresivo deterioro del medio ambiente; así, la contaminación ambiental es uno de los problemas más álgidos que afecta a toda la sociedad (Hernández et al., 2007). Según cifras oficiales de la ONU, anualmente se generan aproximadamente 11.200 millones de toneladas de desechos sólidos y, según un análisis futurista realizado por el Banco Mundial, se espera un crecimiento del 70 % para 2050 si esta tendencia no se revierte (Romero-Sáez, 2022). Ante esta grave problemática, en los últimos años ha ido creciendo la cantidad de estudios referentes a la calidad del agua suelo y aire, así como también, la presencia de contaminantes peligrosos en la biota (Krolow et al., 2021). Sin duda, el mayor desafío de la humanidad en la actualidad, es minimizar el impacto ambiental de diversas sustancias de desecho provenientes del sector industrial y la actividad antropogénica en general (León Agatón et al., 2016); hablamos de contaminantes de naturaleza inorgánica que tienden a acumularse y magnificarse en los seres vivos y se transportan hasta el ser humano por medio de las cadenas tróficas (Londoño Franco et al., 2016), muchos de ellos son altamente tóxicos porque constituyen agentes carcinogénicos y teratogénicos (Broche-Galindo et al., 2022), siendo altamente peligrosos para la salud; asimismo, están los contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales que se caracterizan por su alta solubilidad y escasa biodegradación, además de que promueven el incremento de la demanda de oxígeno ocasionando “hipertroficación” poniendo en peligro la permanencia de la vida acuática (Valladares-Cisneros et al., 2017). Adicionalmente, esta problemática repercute en el aprovechamiento del paisaje con fines de ecoturismo, constituyendo un limitante para el desarrollo económico de los países dotados de recursos valiosos.

La agroindustria, por su parte, es una actividad económica de gran importancia porque su finalidad es producir alimentos y otros productos de primera necesidad (Parra Reyes & Pérez, 2023) utilizando procesos estrictamente diseñados bajo principios de rentabilidad, competitividad y sostenibilidad siempre respetando al medio ambiente. Las empresas agroindustriales anualmente generan grandes cantidades de residuos que constituyen un problema por la demanda económica que genera su descarte y el impacto ambiental que ocasionan, en muchos casos, estos materiales son eliminados al medio ambiente o incinerados contribuyendo al aumento de gases invernaderos en la atmósfera (Correa-Gallego & Villegas-Bolaños, 2021; Aguiar et al., 2021; Barz et al., 2018). Por lo tanto, siguiendo el esquema de la economía circular y la sostenibilidad, las diversas alternativas de aprovechamiento de residuos agroindustriales pueden mejorar la rentabilidad de la actividad al mismo tiempo que se minimizan la inversión en su descarte y se contribuye a la solución de problemas (González-Díaz & Véliz-Jaime, 2020). De esta forma, el presente artículo de revisión bibliográfica, tiene como objetivo compilar información para identificar las oportunidades de aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes.

2. Materiales y métodos

La presente es una investigación de tipo cualitativo, basada en la revisión bibliográfica de artículos científicos nacionales e internacionales producidos en los últimos 10 años que muestran las diferentes alternativas de aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes. Para tales efectos se buscó literatura científica en las bases de Scielo, Dialnet y Scencedirect; encontrándose artículos en idioma español inglés y portugués de libre acceso. Los términos de búsqueda utilizados fueron: “medios contaminados”, “desechos agroindustriales” y “residuos agroindustriales”, en tal sentido, se encontraron inicialmente 36 artículos, de los cuales, fueron descartados 16 artículos debido a que no estaban acorde a los objetivos del presente estudio, posteriormente, los 20 artículos fueron revisados cuidadosamente para corroborar que cumplan con los criterios de inclusión planteados, tras lo cual, se seleccionaron 12 artículos, con los cuales se realizó el presente estudio de revisión.

Los criterios de inclusión fueron: considerar estudios experimentales realizados en la última década, y que presenten como objetivos aprovechar los residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes. Asimismo, se tomaron como criterios de exclusión: estudios de revisión bibliográfica y aquellos realizados con más de 11 años de antigüedad.

Entre los 12 artículos seleccionados se encontraron 7 estudios que utilizaron residuos agroindustriales en la remoción de metales pesados en medios contaminados y 5 artículos en los cuales se estudia la remoción de colorantes usando residuos agroindustriales. En la Tabla 1 se muestran las características de cada estudio.

Tabla 1. Características de los estudios seleccionados y su relación con los objetivos de este estudio

Nombre del estudio	Autores	Relación con los objetivos
"Reutilization of waste biomass from sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams: Applications in the metal ions removal"	(Licona-Aguilar et al., 2022)	Identificar las formas de aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de metales
"Taguchi design-based enhancement of heavy metals bioremoval by agroindustrial waste biomass from artichoke"	(Fernández-López et al., 2019)	
"Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo"	(Parra Reyes & Pérez, 2023)	
"Remoción de plomo por biomasa residual de cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i>) y zuro de maíz (<i>Zea mays</i>)"	(Tejada Tovar et al., 2016)	
"Use of agro-industrial residues of plantain (<i>Musa paradisiaca</i>) in the adsorption of Ni (II)"	(Tejada-Tovar et al., 2022)	
"Adsorption Thermodynamics of Cr(VI) Removal by Using Agro-Industrial Waste of Oil Palm Bagasse and Plantain Peels"	(Villabona Ortíz et al., 2020)	
"Evaluación de residuos agroindustriales como biofiltros: remoción de Cr (VI) en efluentes de curtiembres sintéticos"	(Dávila-Martínez et al., 2017)	Identificar las formas de aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de colorantes
"Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling"	(Meili et al., 2019)	
"Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes"	(Ponce et al., 2021)	
"Cáscara de Piña como Adsorbente de Colorantes Típicos de la Industria Textil"	(Ardila Ramírez et al., 2018)	
"Removal and adsorption kinetics of methylene blue dye by pristine cotton husk bracts (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) from agroindustrial waste"	(Zavala-Flores et al., 2024)	
"Valorization of agroindustrial orange peel waste during the optimization of activated carbon-multiwalled carbon nanotubes-zinc oxide composites used in the removal of methylene blue in wastewater"	(Licona-Aguilar et al., 2024)	

3. Resultados y Discusiones

Antes de presentar los resultados de esta revisión bibliográfica, es importante destacar la creciente relevancia del aprovechamiento de los residuos agroindustriales dentro de las políticas

de la moderna economía circular. Anteriormente, todas las actividades económicas seguían el modelo de la economía lineal que se caracterizaba por el esquema: extraer, transformar, consumir y desechar, haciendo uso indiscriminado de los recursos naturales, lo que genera problemas como la deforestación, disminución de recursos básicos como el agua, contaminación, generación de gases invernaderos, entre otros (Veliz López et al., 2024). Cifras estadísticas revelan que el mundo consume alrededor de un 70% más de los recursos naturales, y el índice de consumo muestra que sólo el 20% de la humanidad es responsable del 80% del consumo total. Por otra parte, las estimaciones del crecimiento demográfico y del proceso de ocupación de los grandes centros urbanos indican que los patrones de consumo de la sociedad tienden a aumentar gradualmente (Silva & Sauka, 2024). En vista de esta realidad, el planteamiento de una economía lineal está quedando obsoleto dando paso a un nuevo modelo caracterizado por la sostenibilidad y la reutilización; para Silva-Alvarado et al. (2023), la economía circular constituye un modelo alternativo a la economía convencional que busca la optimización del uso de recursos en todas las industrias, reducir al mínimo los desechos, promoviendo un ciclo continuo de reutilización, reciclaje y regeneración de materiales y productos. En el mismo enfoque, Da Costa (2022), señala que la economía circular se basa en aminorar el uso indiscriminado de recursos naturales, la disminución de insumos, una mayor participación de energías y recursos renovables, reducir paulatinamente las emisiones de gases invernaderos, mantener y potencializar las actividades económicas en las naciones de manera sostenible. Considerando estos planteamientos ubicamos en el sector manufacturero a una de las actividades más importantes: la agroindustria; para Moctezuma-López (2023) la agroindustria alimentaria constituye conjunto de actividades que trabaja con productos del campo y recursos hídricos para el consumo directo y/o que han sido transformados industrialmente y son distribuidos en establecimientos comerciales. Según “La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” esta actividad se encarga de transformar materias primas y recursos intermedios provenientes del sector agrícola, ganadero, forestal, pesca, entre otros, en alimentos y productos de primera necesidad. En tal sentido, la agroindustria genera anualmente grandes cantidades de desechos con potencialidades de aprovechamiento; pero actualmente, constituyen un problema económico-ambiental para la empresa y la sociedad (Reyes & Barrenechea Ramirez, 2022). El enfoque de reutilización de residuos agroindustriales no solo busca mitigar el impacto ambiental que generan, reducir los desafíos económicos y logísticos asociados a su disposición final, sino también, revalorizar estos residuos e integrarlos nuevamente en procesos industriales, aprovechando su alta concentración de materia orgánica y bajo costo. Asimismo, estas prácticas contribuyen a soluciones sostenibles frente a problemas globales como la escasez de combustibles convencionales, la toxicidad y los altos costos de los abonos comerciales, la falta de energías renovables y la contaminación del suelo y del agua causada por diversas industrias (Rojas-González et al., 2019). Considerando esta realidad, diversas investigaciones denotan las diferentes posibilidades de aprovechamiento de residuos agroindustriales, y teniendo en cuenta que muchas industrias expiden sustancias contaminantes al medio ambiente, se presenta a continuación los resultados del análisis de los artículos seleccionados en el tema de aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes.

3.1. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de metales

En la naturaleza es común encontrar metales pesados en ligeras concentraciones de tal forma que no afectan a los seres vivos (García Quintana et al., 2021); sin embargo, el crecimiento poblacional, el auge de diversas actividades económicas extractivas, el uso inadecuado de los suelos por fertilizantes químicos, y el desarrollo industrial en general, están elevando los niveles habituales de concentración, constituyendo un grave problema (Romero Bonilla et al., 2024; Garza-León et al., 2023; Hernández Lavalle et al., 2023). Los metales pesados se caracterizan por su alta capacidad de interacción con las biomoléculas, aun cuando diversos procesos bioquímicos los

requieren pequeñas concentraciones, son difíciles de metabolizar por lo que tienden a acumularse rápidamente en tejidos biológicos, lo que lleva el nombre de: bioacumulación (Cala-Calviño et al., 2024). Diversos estudios han demostrado que estos contaminantes alteran principalmente a los recursos hídricos para luego incorporarse peligrosamente a las cadenas tróficas impactando negativamente en la salud pública (Salinas García et al., 2023); se tiene conocimiento que los más dañinos para la salud humana son los iones de plomo, que afectan principalmente el sistema nervioso central y gastrointestinal, causando dolor de cabeza, mareos, violencia, pérdida de memoria, problemas de músculos extensores, inflamación gastrointestinal, vómitos y diarrea. Otros iones tóxicos son: Ni(II), que interfieren en el funcionamiento de las células inmunes; Cd(II), cuya ingestión puede provocar vómitos, calambres abdominales y dolor de cabeza; Cr(VI), principalmente afecta hígado, riñones y órganos del sistema respiratorio, además de úlceras, hemorragias y dermatitis de la piel si la exposición es prolongada; Al(III); puede dañar el cerebro provocando encefalopatía y desarrollo de otras enfermedades graves como el Alzheimer y Lou Gehring (Neris et al., 2019).

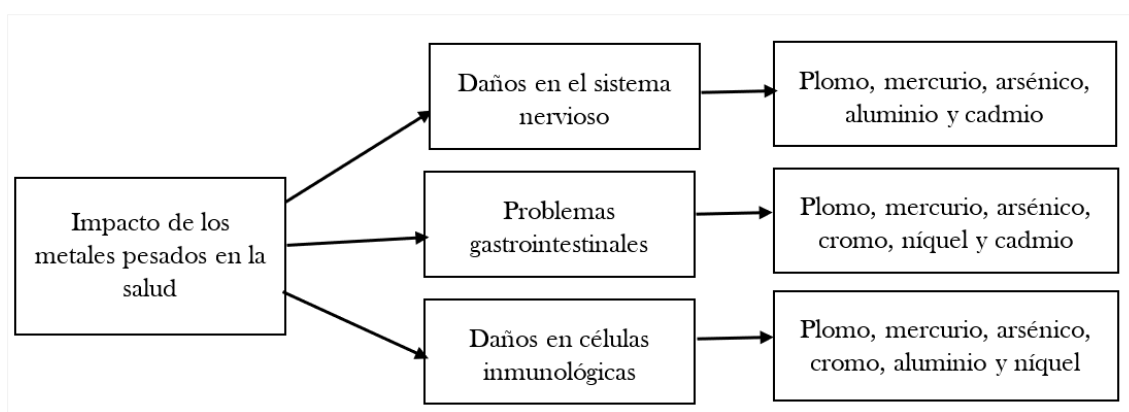


Figura 1. Impacto de los metales pesados en la salud humana

Para minimizar el grave impacto de los metales pesados en el medio ambiente, los investigadores vienen trabajando con diversas técnicas, tales como la coagulación, intercambio iónico, electrocinética, precipitación, ósmosis inversa, adsorción, entre otras; así, la literatura científica ha reportado grandes avances en cuanto a la adsorción especialmente utilizando desechos vegetales debido a su riqueza en polímeros orgánicos como la celulosa y lignina, moléculas que tienen la propiedad de retener mediante enlace químico, estos contaminantes e incorporarlos a nivel celular (Thakur et al., 2020).

La agroindustria genera anualmente una gran cantidad de residuos ricos en compuestos lignocelulósicos con características ideales para elaboración de carbones activados destinados a depurar metales pesados. Licona-Aguilar et al. (2022) plantearon el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar y cáscara de naranja en la elaboración de carbones activados por medio de métodos fisicoquímicos, en este estudio se logró demostrar que los materiales adsorbentes de carbono obtenidos a partir de residuos agroindustriales son excelentes candidatos para reducir la contaminación por iones de metales pesados. Los resultados del estudio revelaron que las condiciones óptimas de proceso son: temperatura de pirólisis a 400 °C; temperatura de activación a 700 °C durante 2 h y agente químico (ácido fosfórico 85 % en peso). El índice de cristalinidad y la morfología de los carbones activados pueden modularse a partir de la temperatura de sinterización, debido a la degradación de compuestos celulósicos. Asimismo, el carbón de cáscaras de naranja muestra estructuras rugosas más uniformes a altas temperaturas de sinterización (700 °C) en comparación con el carbón activado sintetizado a partir de bagazo de caña de azúcar. Ambos carbones se utilizaron para producir espumas de carbono, las cuales adoptan con facilidad la morfología de la espuma de poliuretano desarrollando una superficie libre de microfisuras. Las isotermas de adsorción-desorción mostraron que las estructuras carbonosas obtenidas presentan una combinación de isotermas de tipo I y IV. Esta clasificación prevaleció

incluso después del proceso de eliminación del metal, lo que indica que los materiales adsorbentes se clasifican como microporosos y mesoporosos con gran área superficial. El carbón activado de cáscaras de naranja mostró una variación de $91,92 \text{ m}^2 \text{ gramo}^{-1}$ a valores de $1332,18 \text{ m}^2 \text{ gramo}^{-1}$ al aumentar la temperatura de sinterización de 500 a $700 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que se observó una tendencia opuesta en los carbones de bagazo de caña, donde la superficie específica se redujo de $483,54$ a $31,17 \text{ m}^2 \text{ gramo}^{-1}$. Por el contrario, la espuma de carbono de ambas fuentes mostró valores entre $249,33$ ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) y $293,65 \text{ m}^2 \text{ gramo}^{-1}$ ($700 \text{ }^\circ\text{C}$) de cáscaras de naranja y $11,37$ ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) - $501,81$ ($700 \text{ }^\circ\text{C}$) $\text{m}^2 \text{ gramo}^{-1}$, con una mayoría de diámetro de poro entre 3 y 4 nm . Las mediciones del potencial zeta mostraron una tendencia a mejorar la adsorción de materiales carbonosos utilizando un pH superior a 5 . El tratamiento de agua artificial demostró que ambas fuentes pueden usarse para eliminar iones metálicos mediante la adsorción de estructuras carbonosas como óxidos/hidróxidos, carbonatos y compuestos de fosfato. En las mejores condiciones, los carbones activados de bagazo de caña eliminaron $94 \pm 4,7\%$ (Pb) y $85,1 \pm 4,25\%$ (Cu); mientras que los carbones activados de cáscaras de naranja eliminaron $90,4 \pm 4,52\%$ (Pb) y $78,45 \pm 3,92\%$ (Cu); el cual se obtuvo con un pH regulado en la solución de 8 . Cuando se utilizaron los carbones activados para producir espumas, la fuente que mostró el mejor desempeño en la remoción de iones de metales pesados fue el carbón de cáscaras de naranja; Pb ($95,2 \pm 3,96\%$) y Cu ($94,7 \pm 4,88\%$), considerando condiciones como valores de pH superiores a 5 y temperatura ambiente. Los grupos funcionales (grupos carboxilo y carbonilo) se promueven a pH superiores a 5 y son esenciales para lograr una eliminación eficiente. Los datos de equilibrio de los adsorbentes se correlacionaron satisfactoriamente con la isoterma de Langmuir y los modelos BET modificados ($R^2 = 0,999$), lo que indica que el proceso de adsorción se produce en la superficie de la monocapa de carbono por sitios que tienen la misma energía (en términos de dosis de adsorbentes y concentraciones de adsorbato utilizadas en este estudio). Los resultados señalaron que las estructuras carbonosas se pueden utilizar en el tratamiento de agua o como adsorbentes en tecnologías verdes.

La depuración de metales pesados en corrientes acuosas es de especial interés debido a su naturaleza altamente tóxica y persistente, Fernández-López et al. (2019) realizaron un estudio utilizando biomasa de desechos agroindustriales de alcachofa como sorbente económico utilizando el método Taguchi de diseño de experimentos para mejorar la eliminación bioadsorptiva de Pb(II), Cu(II) y Cd(II) de soluciones acuosas. En este estudio, la biomasa sorbente fue caracterizada mediante espectroscopia infrarroja (FTIR), revelando la presencia de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo, sulfónico y amina. Los autores realizaron clasificaciones de cuatro factores (pH, temperatura, dosis de sorbente y concentración inicial de metal) en tres niveles cada uno, en una matriz L9, en pruebas de sorción por lotes, para los iones metálicos individuales de interés. La capacidad de sorción (q_{mi}) se transformaron en una relación señal/ruido (S/N) precisa para una respuesta de "cuanto más alto, mejor". Se determinaron las mejores condiciones para la sorción individual de metales pesados, alcanzando hasta $86,2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para Pb, $35,8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para Cd y $24,4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para Cu. Este artículo también analiza los aspectos cinéticos y de equilibrio del proceso de sorción. Se describieron las isotermas de sorción mediante el modelo Sips. Asimismo, los datos experimentales mostraron que los perfiles cinéticos de absorción de los tres iones metálicos se ajustaban estrechamente al modelo de pseudosegundo orden. Otro estudio interesante orientado a la depuración de plomo y cromo fue el de (Parra Reyes & Pérez, 2023) en el cual utilizaron aserrín fique y capacho de maíz para la elaboración de los respectivos adsorbentes. Los autores evaluaron las isotermas de sorción, capacidad de adsorción y tiempos de equilibrio para ambos residuos; así, identificaron isotermas de adsorción tipo Freundlich para el fique cuya capacidad de adsorción de Cr fue de $7,81 \pm 1,40 \text{ mg/g}$ y para Pb de $169,51 \pm 1,37 \text{ mg/g}$ a 12 horas de tiempo de equilibrio. Asimismo, se identificaron isotermas tipo Langmuir para el capacho de maíz y una capacidad de adsorción de cromo de $13,35 \pm 3,28 \text{ mg/g}$ y plomo de $15,01 \pm 3,47 \text{ mg/g}$. Finalmente, este estudio dio como resultado un dato importante en cuanto al fenómeno de desorción a niveles bajos en especial en el fique, lo que puede minimizar la liberación de estos contaminantes al ambiente después del tratamiento.

Considerando que el plomo es un contaminante peligroso para el ser humano a toda edad, la literatura científica registra otros estudios como el de Tejada Tovar et al. (2016) donde se utilizan

cáscara de naranja y zuro de maíz como materiales bioadsorbentes. En esta investigación los autores compararon estas biomásas realizando variaciones en el pH y el tamaño de las partículas para determinar los mejores parámetros de adsorción; así, ambos materiales fueron secados en estufa a 90 °C por espacio de 24 horas; luego fueron molidos y clasificados en tamaños de 0,355mm, 0,5mm y 1mm con ayuda de tamizadores. Luego se separaron las biomásas puras (sin tratamiento) de las biomásas con tratamientos. Las partículas de zuro de maíz pasaron por un tratamiento con ácido cítrico 0,6 M con la finalidad de obtener los niveles de pH esperados; asimismo, las partículas de cáscara de naranja fueron tratadas con cloruro de calcio para reticular la pectina. En el caso del zuro de maíz, los investigadores detectaron una mayor capacidad de adsorción con partículas de 0,5 mm y pH de 6 registrándose una remoción de 67,5%; y en el caso de la cáscara de naranja se lograron niveles de adsorción de 99.2% a un tamaño de partícula de 1 mm a un pH de 6, en ambos casos estas cifras fueron las más altas trabajando con biomásas puras. Por otra parte, los autores identificaron que los datos obtenidos presentaron un mejor ajuste con el modelo de isoterma Freundlich.

Otro peligroso contaminante identificado entre los metales pesados es el níquel (II), uno de los materiales más usados en la elaboración de pinturas, confección de baterías, producción de aleaciones níquel-hierro, obtención de sales de cobre, en plantas hidroeléctricas, y en la galvanoplastia; también, este peligroso contaminante se libera al medio ambiente durante la quema de combustibles convencionales y diversos residuos (Suazo-Madrid et al., 2010). En tal sentido, Tejada-Tovar et al. (2021), plantearon la remoción de Ni (II) con biomásas residuales de la producción de almidón de plátano; en esta investigación se estudiaron parámetros termodinámicos del proceso de adsorción, efectos de la temperatura y dosis, los autores identificaron que las mejores condiciones para la eliminación de níquel fueron 368 mg/L, 0,6775 g de adsorbente y 55 °C, obteniéndose un rendimiento del 87% y una máxima capacidad de adsorción de 47,57 mg/g. Asimismo, la cinética de adsorción presentó mejor ajuste al modelo de pseudosegundo orden y la isoterma a los modelos de Langmuir y Freundlich, con lo cual, se estima que la biomasa residual estudiada constituye una alternativa viable y sostenible para la eliminación de Ni (II) en medios acuosos contaminados.

El cromo (VI) es muy utilizado en la industria de curtiembres, en la fabricación de colorantes, fabricación de inhibidores de corrosión y en la industria de transformación de la madera; generalmente los desechos de estas industrias pasan a las fuentes de agua naturales sin tratamientos previos contaminándolas. Otra forma de contaminación por cromo es por medio de la quema indiscriminada de combustibles como el petróleo, la producción y transformación del acero y soldaduras en general, generando peligrosos residuos a nivel del aire (Molina Montoya et al., 2010). En vista a esta problemática, Villabona Ortíz et al. (2020) y Dávila-Martínez et al. (2017) experimentaron con residuos agroindustriales para remover Cr(VI) de medios contaminados. En el estudio de Villabona-Ortíz et al. (2020) se utiliza bagazo de palma y cáscaras de plátano para la elaboración de adsorbentes; así la experimentación reveló que la temperatura influye directamente en la capacidad de adsorción notándose una tendencia lineal con el uso de cáscaras de plátano; sin embargo, no se observó una tendencia definida con el bagazo de palma. Por otra parte, el estudio de los parámetros termodinámicos reveló que ambos materiales tienen una alta afinidad con los iones de Cr(VI), notándose un proceso de remoción reversible espontáneo hasta 328,15 °K para el bagazo de palma; y, en el caso de las cáscaras de plátano se identificó un proceso exotérmico hasta 328,15 °K y endotérmico a temperaturas más altas. Con estos resultados, los autores concluyeron que ambas biomásas tienen un alto potencial para ser usadas en la fabricación de biofiltros para la remoción de Cr(VI) en medios acuosos contaminados. De manera similar, Dávila-Martínez et al. (2017) plantearon el uso de cáscaras de plátano y de naranja en diferentes concentraciones para la fabricación de biofiltros capaces de depurar el Cr(VI) de medios acuosos contaminados. En la experimentación de laboratorio, los autores prepararon soluciones acuosas de Cr(VI) que emulen las concentraciones encontradas en aguas residuales procedentes de la curtiembre (32,6 mg/kg) así como formularon 5 biofiltros a diferentes concentraciones de las biomásas estudiadas como se detalla en la Tabla 1. Las pruebas de adsorción se desarrollaron en reactores Batch de policloruro de vinilo de forma cilíndrica a los que se colocaron las muestras por espacio de dos horas, luego de eso se determinó la

concentración de Cr(VI) a partir de 50 ml de agua contaminada; así, se comenzó el proceso con 32,6 ppm de Cr(VI) para cada tratamiento, disminuyendo hasta cifras entre 2,0 ppm y 8,8 ppm que representan entre el 73% y 93% de remoción. Los resultados del estudio reflejaron que el mejor adsorbente fue Fd (30% cáscaras de naranja y 70% cáscaras de plátano) con el cual se logró una remoción del 93% de Cr (VI), seguido de Fb (70% cáscaras de naranja y 30% cáscaras de plátano), Fc (50% cáscaras de naranja y 50% cáscaras de plátano), Fe (100% cáscaras de plátano) y Fa (100% cáscaras de naranja) que consiguió el 73% de remoción. En base a estas cifras, los autores concluyeron que todos los tratamientos presentan alta eficiencia en la depuración de este peligroso metal en aguas residuales.

Tabla 2. Concentraciones de biomasa en los biofiltros a partir de residuos agroindustriales

Biofiltro	Concentraciones
Fa	100% cáscaras de naranja
Fb	70% cáscaras de naranja y 30% cáscaras de plátano
Fc	50% cáscaras de naranja y 50% cáscaras de plátano
Fd	30% cáscaras de naranja y 70% cáscaras de plátano
Fe	100% cáscaras de plátano

Fuente: Elaboración Propia a partir de Dávila-Martínez et al. (2017)

3.2. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la remoción de colorantes

Según Gallego Ramírez & Rubio Clemente (2022), alrededor de 10000 tipos de colorantes son usados por sectores industriales como el textil, de curtiembres, cosméticos y farmacéuticos. La industria textil genera graves problemas de contaminación debido a que entre el 15 y el 50% de los colorantes utilizados en el teñido no se fijan en las telas y se vierten en aguas residuales. Según Barrios-Ziolo et al. (2015) los compuestos sintéticos que generan coloración en las aguas residuales se caracterizan por su alta solubilidad, producen tonos brillantes y presentan bajos costos de producción, atributos que son ideales para las industrias. Estos colorantes por lo general, son de difícil degradación y generan productos y subproductos altamente tóxicos de tipo carcinogénico y mutagénico (Pérez-Villar et al., 2022). Por otra parte, el tratamiento de aguas residuales coloreadas es complicado y costoso debido a su resistencia a los procesos de oxidación biológica, tratamientos químicos como la hidrólisis ácida o básica (Manrique Losada et al., 2017), por lo cual, la ciencia ha planteado otros mecanismos no convencionales, entre ellos la electrocoagulación, tratamientos con ozono, procesos fotocatalíticos, fenton y recientemente procesos de adsorción (Pérez-Villar et al., 2022).

La literatura científica ha registrado estudios como los de Meili et al. (2019), Ponce et al. (2021), Zavala-Flores et al. (2024) y Licona-Aguilar et al. (2024) en los que se aprovechan residuos agroindustriales para la adsorción de azul de metileno, un colorante muy usado en la industria textil. En tal sentido, Meili et al. (2019), trabajó con residuos de guanábana (cáscara, semillas y fibra de pulpa) y bagazo de caña de azúcar realizando experimentos por lotes con diferentes parámetros para estimar los efectos de la cantidad de bio-sorbente, la concentración de colorante y la velocidad de agitación. En este estudio, los mejores resultados fueron obtenidos utilizando desechos de guanábana para una concentración del colorante de 100 mg L⁻¹, utilizando 0,75 g de residuo y una velocidad de agitación de 110 rpm, eliminando un porcentaje superior al 90%, mientras que con el bagazo de caña de azúcar se logró una remoción máxima del 90,4%, con una concentración de colorante de 50 mg L⁻¹, cantidad de bio-sorbente de 0,5 g y velocidad de agitación de 110 rpm. Asimismo, se observó que la cinética de adsorción se puede describir mediante el modelo de pseudo-segundo orden y que los modelos Redlich-Peterson y Sips son ideales para interpretar la adsorción de equilibrio del colorante en bagazo de caña de azúcar y residuo de guanábana, respectivamente. De manera similar, en el estudio de Ponce et al. (2021) se usaron bagazo de caña de azúcar, cáscara de maíz y cáscara de arroz para la fabricación de bio-adsorbentes. En la experimentación, ambas materias primas pasaron por un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio a una concentración 0.1 M con la finalidad de eliminar parte del componente polimérico de las fibras e intensificar la adsorción del tinte. Los resultados de este estudio revelaron que las tres materias primas tienen potencialidades para depurar azul de

metileno; así, el residuo que mostró un porcentaje mayor de adsorción fue el bagazo de caña ($95,7 \pm 1,9\%$), seguido de cáscara de maíz ($98,5 \pm 1,2\%$) y finalmente cáscara de arroz ($95,4 \pm 0,8\%$). Un dato importante de esta investigación es que el uso de tratamientos alcalinos previos a los procesos de adsorción logra optimizar el aprovechamiento de los materiales lignocelulósicos empleados. Considerando también el uso de residuos directos del campo de cultivo, Zavala-Flores et al. (2024) utilizaron brácteas prístinas de cáscara de algodón para la elaboración de adsorbentes de azul de metileno. La experimentación se realizó por lotes variando el tiempo de contacto, pH, dosis de adsorbente y concentración inicial de tinte (1 a 100 mg/L). Los resultados revelan que 20 mg del material estudiado logran depurar el 94% de 20 mg/L de azul de metileno. En este estudio, también se observó que la cinética de adsorción se puede describir acertadamente por medio del modelo de pseudo segundo orden; asimismo, los resultados termodinámicos indican que el mecanismo de adsorción entre el material estudiado y el colorante es un proceso espontáneo, exotérmico con una disminución del desorden de las moléculas de adsorbato en el adsorbente para todas las temperaturas estudiadas (293, 313, 333 °K).

De manera similar Licon-Aguilar et al. (2024) utilizaron cáscaras de naranja y nanotubos de carbono de paredes múltiples para la elaboración de carbones activados modificados por la adición de óxido de zinc a diferentes concentraciones. Las cáscaras de naranja se calcinaron a 550 °C durante 1 h y se activaron mediante un tratamiento fisicoquímico generándose carbón activado. Los nanotubos de carbono pasaron por un tratamiento con ácido nítrico y ácido sulfúrico. Ambos materiales se mezclaron añadiendo diferentes concentraciones de óxido de zinc (15 o 30% en peso). Los resultados de este estudio reflejan una buena dispersión de las nanopartículas de ZnO en las superficies de carbón con microporos y una rugosidad superficial que facilita los fenómenos de adsorción, consecuentemente, el área superficial de los compuestos mejora significativamente. Las condiciones óptimas se observaron con una cantidad de nanopartículas de ZnO de 30% en peso, pH 8-10, concentración máxima de 80 ppm de azul de metileno y 24 h de tiempo de adsorción. En estas condiciones, la capacidad máxima de adsorción fue de $1250 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para compuestos nanotubos-ZnO y carbón activado-nanotubos-ZnO, mientras que el carbón activado mostró una capacidad de adsorción máxima de $169,49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Así, los materiales compuestos para eliminar eficientemente el azul de metileno del agua contaminada fueron nanotubos-ZnO y carbón activado-nanotubos-ZnO, que alcanzaron valores cercanos al 90%.

De forma similar Ardila Ramírez et al. (2018) plantearon el uso de cáscaras de piña cultivadas en Chocó y Urabá Antioqueño como materias primas para la elaboración de adsorbentes de diversos colorantes; para lo cual, los autores elaboraron una mezcla que simula la composición de las aguas residuales textiles. La experimentación se realizó variando niveles de pH, tiempos de adsorción, tamaños de partículas de los adsorbentes y las mezclas contaminadas, pero manteniendo constantes la cantidad de adsorbente (150 mg) y la concentración de contaminantes (50 ppm), asimismo, se realizaron pruebas de reutilización del material adsorbente. Los resultados de este estudio revelaron que el porcentaje de adsorción se incrementa con la disminución de pH, observando una mayor capacidad de adsorción a pH 2.1. Asimismo, se observó una relación inversa entre el porcentaje de adsorción y el tamaño de las partículas, notándose una mayor adsorción con partículas de 0.6 mm de diámetro. Con relación al tiempo del proceso, se observó que a partir de 8 horas de contacto ya no se producía más adsorción. Finalmente, el estudio reporta porcentajes de recuperación de colorantes del 59.2 ± 1.9 con las cáscaras de piña del Urabá y del 51.7 ± 2.1 con las cáscaras de piña del Chocó.

4. Conclusiones

Luego del análisis de los 12 estudios de investigación seleccionados para elaborar el presente artículo de revisión, identificamos grandes oportunidades de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en la depuración de medios contaminados; asimismo, notamos que es de suma importancia realizar más estudios que evalúen los parámetros ideales para el aprovechamiento de estos residuos, no sólo en la depuración de metales pesados y colorantes, sino también la

adsorción de otros contaminantes. Considerando su alta proporción de compuestos lignocelulósicos, los residuos agroindustriales son excelentes candidatos para generar carbón activado, un material de múltiples utilidades en la industria. Los resultados de las diferentes investigaciones analizadas reflejan la efectividad de los desechos agroindustriales en la depuración de peligrosos metales y colorantes en aguas residuales, además de que constituyen materias primas de bajo costo, pero que generan un alto impacto medioambiental; en tal sentido, las investigaciones en este campo no sólo vislumbran las oportunidades de uso de los desechos para mitigar problemas medioambientales, sino también, ofrecen interesantes oportunidades económicas si se utilizan a mediana y gran escala.

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

La autora declara no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autoría

M-M, L. A.: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura (preparación del borrador final) y supervisión.

M-M, L. A.: Investigación, metodología y curación de datos.

M-M, L. A.: Tratamiento de datos.

M-M, L. A.: Investigación, recopilación de datos.

Referencias bibliográficas

- Aguiar, S., Arboleda, L., & Uvidia, H. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Alfa*, 5(15), 649–660. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145>
- Ardila Ramírez, C., María Palacio, Á. M., & Barrera Zapata, R. (2018). Cáscara de Piña como Adsorbente de Colorantes Típicos de la Industria Textil. *Ciencia En Desarrollo*, 9(2), 161–168. <https://doi.org/10.19053/01217488.v9.n2.2018.7689>
- Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., & Cardona Gallo, S. A. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. *DYNA*, 82(191), 118–126. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>
- Barz, M., Delivand, M. K., & Dinkler, K. (2018). Agricultural Wastes – A Promising Source for Biogas Production in Developing Countries of the Tropical and Subtropical Regions. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), 02–12. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3991>
- Broche-Galindo, M. H., Leandro Rodríguez-Rico, I., María Pérez-Villar, M., & Prieto-García, J. O. (2022). Equilibrio y modelos cinéticos en la adsorción de azul de metileno sobre residuos agroindustriales. *Tecnología Química*, 42(3), 420–434. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000300420
- Cala-Calviño, L., Morris Quevedo, H. J., Sagaró del Campo, N. M., Prades Escobar, E., Garrido Larramendi, D., Cala-Calviño, L., Morris Quevedo, H. J., Sagaró del Campo, N. M., Prades Escobar, E., & Garrido Larramendi, D. (2024). Cuantificación de metales en LECISAN® por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente. *Revista Información Científica*, 103, 1–13. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1028-99332024000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Correa-Gallego, V., & Villegas-Bolaños, P. A. (2021). Valorización de Residuos de Bagazo de Caña y Plásticos para la Generación de Compuestos Energéticos. *Producción + Limpia*, 16(1), 117–135. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n1a7>
- Da Costa, C. C. (2022). La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos. *Revista Economía y Política*, 35, 1–18. <https://doi.org/10.25097/rep.n35.2022.01>
- Dávila-Martínez, T. A., Sánchez-Peña, N. E., Ordoñez Erazo, D. A., Muñoz-López, J. F., & Benítez-Benítez, R. (2017). Evaluación de residuos agroindustriales como biofiltros remoción de cr (VI) en efluentes. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 1(1), 49–58. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612017000300006
- Fernández-López, J. A., Angosto, J. M., Roca, M. J., & Doval Miñarro, M. (2019). Reutilization of waste biomass from sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams: Applications in the metal ions removal. *Science of The Total Environment*, 653, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.343>
- Gallego Ramírez, C., & Rubio Clemente, A. (2022). *Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de biocarbón*. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/2765>
- García Quintana, Y., Arteaga Crespo, Y., Chico Caiza, V. del R., García Decoro, S., Luna Fox, S. B., Bañol Pérez, C., García Quintana, Y., Arteaga Crespo, Y., Chico Caiza, V. del R., García Decoro, S., Luna Fox, S. B., & Bañol Pérez, C. (2021). Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 12(1), e836. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/682#.YLLQCgmXiKw.mendel ey>
- Garza-León, C. V., Fernández-Flores, C. A., Arzate-Cárdenas, M. A., Rubio-Franchini, I., & Rico-Martínez, R. (2023). Differential effects on the toxicity and bioconcentration of hexavalent and trivalent chromium on the rotifer *Lecane papuana* (Murray, 1913) (Monogononta: Lecanidae). *Hidrobiológica*, 33(3), 329–338. <https://doi.org/10.24275/LCZI5134>
- González-Díaz, Y., & Véliz-Jaime, M. Y. (2020). Artículo original. *Tecnología Química*, 40(3), 488–501. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000300488
- Hernández Lavalle, L., Rojas Montes, J. C., Arellano Piña, L. R., Martínez Gómez, V. J., & Martínez, D. C. (2023). Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis. *EPISTEMUS*, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.266>
- Hernández, R., Carrasco, P., Mujica, R., & Espínola, M. (2007). Evaluación de la capacidad de adsorción de desechos agroindustriales para la remoción de ácido acético. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 22(3), 31–46. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652007000300004
- Krolow, D., Krolow, I. R. C., Cruz Copetti, A. C., & Santos, D. R. dos. (2021). Waste disposal of small wine and liquor agroindustry into tributaries of the Soturno and Jacuí rivers, Rio Grande do Sul, Brazil. *Idesia (Arica)*, 39(2), 57–66. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200057>
- León Agatón, A., Córdoba Ruiz, J. C., & Carreño Sayago, U. F. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Tecnura*, 20(50), 141–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10>
- Licona-Aguilar, Á. I., Torres-Huerta, A. M., Domínguez-Crespo, M. A., Palma-Ramírez, D., Conde-Barajas, E., Negrete-Rodríguez, M. X. L., Rodríguez-Salazar, A. E., & García-Zaleta, D. S. (2022). Reutilization of waste biomass from sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams: Applications in the metal ions removal. *Science of The Total Environment*, 831, 154883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154883>

- Licona-Aguilar, A. I., Torres-Huerta, A. M., Domínguez-Crespo, M. A., Negrete-Rodríguez, M. L. X., Conde-Barajas, E., Brachetti-Sibaja, S. B., & Rodríguez-Salazar, A. E. (2024). Valorization of agroindustrial orange peel waste during the optimization of activated carbon-multiwalled carbon nanotubes-zinc oxide composites used in the removal of methylene blue in wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 492, 152102. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152102>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Manrique Losada, L., Laguna Castillo, E. J., Osorio Restrepo, E. A., Serna Galvis, E. A., & Torres Palma, R. A. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocatalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar. *Producción + Limpia*, 12(2), 50-60. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a4>
- Meili, L., Lins, P. V. S., Costa, M. T., Almeida, R. L., Abud, A. K. S., Soletti, J. I., Dotto, G. L., Tanabe, E. H., Sellaoui, L., Carvalho, S. H. V., & Erto, A. (2019). Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 141, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.011>
- Moctezuma-López, G. (2023). Contribución de la agroindustria alimentaria mexicana al producto interno bruto durante 1993-2019. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(7), e2901. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i7.2901>
- Molina Montoya, N., Casas, P. A., & Wandurraga, C. C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana / Lead, chromium III and chromium VI and its impact on human health. *Ciencia y Tecnología Para La Salud Visual y Ocular*, 8(1), 77-88. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-560868>
- Neris, J. B., Luzardo, F. H. M., da Silva, E. G. P., & Velasco, F. G. (2019). Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 357, 404-420. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.125>
- Parra Reyes, J. A., & Pérez, E. H. (2023). Estimación de materiales lignocelulosicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 18-27. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>
- Pérez-Villar, M. M., Zorrilla-Velazco, M., Pescoso-Torres, B. M., González-Roche, Y. M., Pérez-Villar, M. M., Zorrilla-Velazco, M., Pescoso-Torres, B. M., & González-Roche, Y. M. (2022). Comportamiento de la remoción de colorantes y materia orgánica en un humedal subsuperficial. Efecto del suelo como sustrato. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 69-86. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-54212022000100069
- Ponce, J., Andrade, J. G. da S., dos Santos, L. N., Bulla, M. K., Barros, B. C. B., Favaro, S. L., Hioka, N., Caetano, W., & Batistela, V. R. (2021). Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100061>
- Reyes, J. M., & Barrenechea Ramirez, S. (2022). Estimación del potencial energético técnico a partir de biomasa residual agroindustrial y pecuario en el Perú. *Revista De Innovación Y Transferencia Productiva*, 3(1), e004. <https://doi.org/10.54353/ritp.v3i1.e004>
- Rojas-González, A. F., Flórez-Montes, C., López-Rodríguez, D. F., Rojas-González, A. F., Flórez-Montes, C., & López-Rodríguez, D. F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química*, 31(1), 31-52. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000100031
- Romero-Sáez, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía

- circular. *TecnoLógicas*, 25(54), e2505. <https://doi.org/10.22430/22565337.2505>
- Romero Bonilla, H., Escudero, M., Solano, L., Romero Bonilla, H., Escudero, M., & Solano, L. (2024). Remoción de cadmio en muestras de agua del estero El Macho, Machala-Ecuador, utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata. *NovasinerGía Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 7(2), 36–51. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.03>
- Salinas García, S. M., Rosero Mosquera, J. D., Andueza Leal, F. D., Burbano Morillo, D. S., Fabara Salazar, D. K., Chamorro Armas, S. E., & Lozada Fiallos, D. D. (2023). Biolixiviación de metales pesados en residuos minero-metalúrgicos. *Siembra*, 10(2), e5538. <https://doi.org/10.29166/siembra.v10i2.5538>
- Silva-Alvarado, P. M., Orozco-Crespo, E., Verduga-Alcívar, D. A., Diéguez-Santana, K., Ruiz-Cedeño, S. del M., & Sablón-Cossío, N. (2023). Prospective of the circular economy in a banana agri-food chain. *Tec Empresarial*, 17(1), 34–52. <https://doi.org/10.18845/te.v17i1.6475>
- Silva, C. L. da, & Sauka, J. E. (2024). Desenvolvimento local e possibilidades de uma economia circular a partir de uma cooperativa de catadores de materiais recicláveis. *Interações (Campo Grande)*, e2524030. <https://doi.org/10.20435/inter.v25i2.4030>
- Suazo-Madrid, E. A., Morales-Barrera, L., Cristiani-Urbina, M. del C., & Cristiani-Urbina, E. (2010). Efecto del pH sobre la biosorción de níquel (II) por *Saccharomyces cerevisiae* var. *Ellipsoideus*. <https://oa.mg/work/1588954311>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, Á., Cortina-Góngora, W., Díaz-Navarro, B., & Ortega Toro, R. (2022). Use of agro-industrial residues of plantain (*Musa paradisiaca*) in the adsorption of Ni (II). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210428>
- Tejada Tovar, C., Herrera, A., & Núñez Zaru, J. (2016). Remoción de plomo por biomasa residual de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) y zuro de maíz (*Zea mays*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n1.2016.126>
- Thakur, V., Sharma, E., Guleria, A., Sangar, S., & Singh, K. (2020). Modification and management of lignocellulosic waste as an ecofriendly biosorbent for the application of heavy metal ions sorption. *Materials Today: Proceedings*, 32, 608–619. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.756>
- Valladares-Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., de la Cruz Burelo, P., & Melgoza Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55–73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Veliz López, I., Mansilla, R., & Nieto-Villar, J. M. (2024). Economía circular: una mirada desde la termodinámica y las ciencias de la complejidad. *INTER DISCIPLINA*, 12(33), 297–313. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2024.33.88250>
- Villabona Ortiz, A., Tejada-Tovar, C. N., & Ortega Toro, R. (2020). Adsorption Thermodynamics of Cr(VI) Removal by using Agro-Industrial Waste of Oil Palm Bagasse and Plantain Peels. *Ingeniería e Investigación*, 40(3), 22–28. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n3.83709>
- Zavala-Flores, E., Z. Flores-López, L., Alonso-Nuñez, G., & Espinoza-Gómez, H. (2024). Removal and adsorption kinetics of methylene blue dye by pristine cotton husk bracts (*Gossypium hirsutum* L.) from agroindustrial waste. *Industrial Crops and Products*, 209, 117947. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117947>