JETYPEKA
Revista Científica Multidisciplinaria
ISSN: 2617-7374. Julio-Diciembre 2026
Vol. 6 Nro.2. Pág: 52-71

ARTÍCULO ORIGINAL

POTENCIAL DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (RHA) COMO ADSORBENTE SOSTENIBLE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Rodrigo Servín Uliambre[1], Ximena Judith Galeano Graupera[2]

Recibido: 03/febrero/2026
Aprobado: 13/mayo/2026
Publicado: 23/octubre/2026

1Universidad Nacional de Pilar, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural, Paraguay, https://orcid.org/0009-0000-2597-1098 , rsuliambre1995@gmail.com

2Universidad Nacional de Pilar, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural, Paraguay, https://orcid.org/0000-0001-9508-8268 , xgaleano31@gmail.com

Potencial de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) como adsorbente sostenible en el tratamiento de aguas residuales

Resumen:

La creciente presión sobre los recursos hídricos, especialmente en zonas rurales y agroindustriales, ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales. En este marco, la ceniza de cáscara de arroz (RHA), subproducto abundante de la agroindustria arrocera, ha ganado relevancia por su capacidad adsorbente, bajo costo y potencial de valorización en esquemas de economía circular. Este artículo revisa críticamente la evidencia científica sobre el uso de RHA en la remoción de contaminantes como metales pesados, colorantes sintéticos, fenoles y pesticidas, identificando tendencias metodológicas, vacíos de conocimiento y oportunidades de aplicación territorial. Se realizó una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2010 y 2025, consultando bases como Scopus, Web of Science y SciELO. Se seleccionaron estudios con enfoque experimental, validación estadística y pertinencia temática. Se priorizaron investigaciones que caracterizan la RHA mediante SEM, FTIR y BET, y aplican modelos de adsorción como Langmuir, Freundlich y Temkin. La evidencia muestra que la RHA activada térmica o químicamente puede alcanzar eficiencias de remoción superiores al 90% en condiciones controladas. Su desempeño varía según el tipo de activación, el contaminante tratado, el pH, la dosis de adsorbente y el tiempo de contacto. Se destaca su eficacia en la eliminación de cadmio, plomo, azul de metileno y residuos de pesticidas. La RHA representa una alternativa ecológica y viable para el tratamiento de aguas residuales en contextos rurales. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la estandarización de procesos, la escalabilidad tecnológica y el manejo post-adsorción. Se recomienda avanzar en estudios aplicados y protocolos adaptados a condiciones territoriales específicas.

Palabras clave: RHA, adsorción, aguas residuales, metales pesados, tratamiento sostenible.

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Tanimbu arro pirekueguigua pokatu (RHA) pyteha jopyjokoha ramo, y ky'a rembyre pohanóme

Ñemombyky:

Jopymyaña ningo okakuaave ohóvo katupururâ yguigua ári, ha tuichave okárare ha temitÿmba'apoguasurekoguaha rupi, péa oguerojera umi mba'aporekokuaaita jopyjokóva y ky'a ñepohanopukurâ. K o pa'ûme, pe Tanimbu osêva pe arro pirekuégui, mba'e osê hetáva umi temitÿmba'apoguasu rupi; ko mba'e oñemombareteve ohóvo ikatúgui oipyte, ndahepyietégui ha ikatúgui hetaiterei mba'e ojejapo ichugui ojepurujeývo. Ko tembikuaareka ohechajey oiporâva ha noîporâitéiva umi tesakârâ kuaapy RHA jepuruguigua oñembojava'ekuépe, ikatu haguâicha oñemyatyrô, oñemombiávo umi mba'e temiñotÿngue mongy'apýva, ha'eháicha kuarepotieta pohýi, mbosa'yha japopyréva, ha opáichagua pohâ mymba vai kógaregua jukaha (fenol, pesticida) ohechakuaávo tembiaporape pyahuvétava, mba'e ne'îrâva gueteri ojekuaa ha umi tendakuéra ijahápe gueteri ojepuru. Ojehecha ha oñembohetekatupykuri umi kuatiañe'ê tembikuaa oñemomarandúva'ekue 2010 ha 2025 rupi, ojehekáva'ekue Scopus, Web of Science ha Scielo-pe. Ojeporavo umi mba'ejeporeka iñandu'aporekóva, papy'aporekóva katupy ha ñe'êmbyrâ rehegua. Oñemomba'ékuri tembikuaaita ombohekoysýiva RHA rehegua, SEM, FTIR ha BET rupive, ha oñemotenonde umi heko pytéva Langmuir, Freundlich ha Temkin-chagua. Kuaapy ojejuhuva'ekue omyesakâ RHA mbopya'evepýva hakujokópe térâ sa'ÿijorekópe ikatuha ohupyty ñemombia mbarete, 90% ikatu ohupyty, jehecha rupive. Heko iñambue imbopya'eve rupi, hekohañembyai ojehecháva rupi, ipH, ijepytekue ñeme'ê tuichakue ha iñemboja arekue. Oñemotenonde ha oñemomba'eguasu ikatupyry omombia haguâ: cadmio, azul de metileno ha pohâ mymba vai kógaregua jukaha rembyre. Pe RHA ojehecha peteî jeporavo tekoháva y ikatúvaramo ojehupyty ha ojejapokatúva oñepohanopuku haguâ y ky'a rembyre umi tenda kokuerekoguáva rupi. Hákatu, oî gueteri apopyrâ tembiapoguatarâguigua, avei pe mba'aporekokuaa ñemboyvateve ha tuichave ohóvo ha tembiapo gueroguata jepyte rire. Oñemomorâ tojeguata umi kuaapy jepurúpe ha mba'aporeko mbojeheguapyre umi yvy ñemopeteîva rekópe.

Ñe'ê tenondegua: RHA, jepyte, y ky'a rembyre, kuarepoti pohýi, pohanopuku jopyjokóva.

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Potential of Rice Husk Ash (RHA) as a Sustainable Adsorbent in Wastewater Treatment

Abstract:

The growing pressure on water resources, particularly in rural and agro-industrial areas, has driven the development of sustainable technologies for wastewater treatment. In this context, rice husk ash (RHA), an abundant byproduct of the rice agroindustry, has gained relevance due to its adsorptive capacity, low cost, and potential for valorization within circular economy frameworks. This article critically reviews the scientific evidence on the use of RHA for the removal of contaminants such as heavy metals, synthetic dyes, phenols, and pesticides, identifying methodological trends, knowledge gaps, and territorial application opportunities. A systematic review of scientific literature published between 2010 and 2025 was conducted using databases such as Scopus, Web of Science, and SciELO. Studies with an experimental approach, statistical validation, and thematic relevance were selected. Priority was given to research that characterizes RHA using techniques such as SEM, FTIR, and BET, and applies adsorption models including Langmuir, Freundlich, and Temkin. Evidence shows that thermally or chemically activated RHA can achieve removal efficiencies above 90% under controlled conditions. Its performance varies depending on the type of activation, the contaminant treated, solution pH, adsorbent dosage, and contact time. Notable efficacy was observed in the removal of cadmium, lead, methylene blue, and pesticide residues. RHA represents a viable and ecological alternative for wastewater treatment in rural contexts. However, challenges remain regarding process standardization, technological scalability, and post-adsorption management. Further applied studies and protocols tailored to specific territorial conditions are recommended.

Keywords: RHA, adsorption, wastewater, heavy metals, sustainable treatment.

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Introducción:

El agua constituye un recurso esencial para la vida en la Tierra, y su disponibilidad resulta fundamental para el desarrollo de múltiples actividades humanas, tales como la industria, el consumo doméstico, la generación de energía y la producción agrícola. No obstante, el agua dulce y fácilmente accesible representa solo una fracción mínima del total disponible en el planeta, lo que la convierte en un recurso limitado y vulnerable.

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional acelerado y el desarrollo urbano han incrementado significativamente la demanda hídrica, generando presiones adicionales sobre los ecosistemas acuáticos. Como consecuencia, se ha observado una creciente contaminación de cuerpos de agua con diversos compuestos, entre ellos metales pesados, plaguicidas y contaminantes emergentes. Estos últimos son especialmente preocupantes debido a su capacidad de provocar efectos genotóxicos y carcinogénicos, lo que representa una amenaza directa para la salud humana y el equilibrio ambiental (Présiga-López et al., 2021).

Aunado a ello, el vertido de aguas residuales sin tratamiento adecuado se ha consolidado como una de las principales problemáticas ambientales del siglo XXI. Esta situación se agrava en contextos rurales y agroindustriales, donde las limitaciones en infraestructura y financiamiento dificultan la adopción de tecnologías convencionales de depuración. En consecuencia, se vuelve imperativo identificar soluciones sostenibles, accesibles y adaptadas a las condiciones territoriales (García-Rojas et al., 2012).

En este marco, la adsorción se ha posicionado como una tecnología emergente eficaz para la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales, tales como metales pesados, colorantes sintéticos y compuestos orgánicos persistentes. Este proceso se fundamenta en la capacidad de ciertos materiales, denominados adsorbentes, para retener sustancias en su superficie mediante interacciones físico-químicas (Instituto del Agua, 2023). La eficiencia de la adsorción depende de variables como el área superficial del adsorbente, la presencia de grupos funcionales activos y las condiciones operativas del sistema (Menéndez-Gutiérrez, 2021).

En este contexto, la cáscara de arroz emerge como un subproducto de gran interés, generado durante la etapa inicial del procesamiento industrial del grano. Tras el tamizado y secado —ya sea en campo abierto o mediante secadoras industriales—, el arroz entero es introducido en dispositivos de separación o molinos, donde se realiza la remoción mecánica de la cáscara. Este residuo representa aproximadamente el 20 % del peso total

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

del grano y se caracteriza por su alta disponibilidad y elevado contenido de carbono orgánico, que oscila entre el 30 % y el 50 % (García Jerez, 2007).

Posteriormente, la combustión controlada de la cáscara genera ceniza de cáscara de arroz (RHA), cuya composición varía en función de la temperatura, el tipo de combustión y la calidad del residuo. En promedio, se obtienen cerca de 25 kg de ceniza por cada 100 kg de cáscara quemada (Singh, 2018; Chipantaxi Cadena & Molina Campoverde, 2023). Esta ceniza presenta propiedades fisicoquímicas que la convierten en un material promisorio para aplicaciones medioambientales, especialmente en procesos de adsorción para el tratamiento de aguas residuales, debido a su porosidad, área superficial y contenido de sílice amorfa.

En relación con lo anterior, diversos estudios han demostrado que la RHA, activada térmica o químicamente, puede alcanzar eficiencias de remoción superiores al 90 % bajo condiciones controladas, lo que la posiciona como una alternativa viable frente a adsorbentes comerciales como el carbón activado (Zhang et al., 2021; Singh & Kumar, 2020).

Por tanto, el objetivo de esta investigación es revisar críticamente la literatura científica sobre el uso de RHA en el tratamiento de aguas residuales, con el fin de identificar tendencias metodológicas, vacíos de conocimiento y oportunidades de aplicación territorial. La relevancia de este estudio radica en su contribución al diseño de soluciones hídrico-ambientales basadas en la valorización de residuos agroindustriales, la promoción de tecnologías limpias y el fortalecimiento de la sostenibilidad hídrica en comunidades vulnerables.

Metodología:

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura científica orientada a analizar el uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA) como adsorbente sostenible en el tratamiento de aguas residuales, para ello, se realizó una búsqueda exhaustiva entre abril y septiembre de 2025 en bases de datos especializadas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO y Google Scholar, utilizando combinaciones de palabras clave en español e inglés: “ceniza de cáscara de arroz”, “rice husk ash”, “adsorción”, “aguas residuales”, “remoción de metales pesados” y “sustainable wastewater treatment”.

Se establecieron criterios de inclusión que consideraron estudios publicados entre 2010 y 2025, con enfoque experimental, validación estadística y pertinencia temática, priorizando aquellos que caracterizan la RHA mediante técnicas como SEM, FTIR, BET y XRD, y que aplican modelos de adsorción como Langmuir, Freundlich y Temkin. Se

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

excluyeron documentos sin revisión por pares, estudios sin especificación del tipo de activación de la RHA y trabajos centrados exclusivamente en combustión energética sin aplicación ambiental.

Los artículos seleccionados fueron organizados en una matriz bibliográfica técnica que incluyó campos como tipo de contaminante tratado, método de activación, modelo cinético, eficiencia de remoción y contexto territorial. Además, se construyó un repositorio documental estructurado que permitió sistematizar más de 60 fuentes revisadas, de las cuales 13 fueron utilizadas directamente en la redacción del artículo. La validación metodológica se apoyó en criterios adaptados del protocolo PRISMA, garantizando la trazabilidad, calidad y relevancia de los estudios analizados.

Pérez (2024) señala que PRISMA se ha convertido en un estándar para tesis doctorales y artículos científicos, ya que proporciona un marco estructurado para definir la pregunta de investigación, establecer criterios de inclusión/exclusión, realizar búsquedas exhaustivas y sintetizar resultados de manera transparente. Recomienda el uso de la checklist PRISMA y el desarrollo de un protocolo detallado como parte del diseño metodológico

Tabla 1

Matriz Bibliográfica

Autor(es)	Año	Título	Tipo de fuente	Tema principal	Enlace
Al-Mashhadani, M., Al-Saadi, A., Jassim, H.	2024	Removal of pesticides from wastewater using thermally activated rice husk ash	Artículo científico	Adsorción de pesticidas	DOI
Ato Alama, K. M., & Peña Guerrero, K. R.	2022	Aplicación de tecnologías limpias en la agroindustria...	Tesis de licenciatura	Tecnologías limpias	UCV
Chipantaxi Cadena, M., Molina, J.	2023	Evaluación de la ceniza de cáscara de arroz como adsorbente...	Tesis	Adsorción en aguas residuales	UTA
Colmán, N. F.	2021	Evaluación de cáscara de arroz como adsorbente natural...	Tesis	Remoción de colorante RB222	UNP
García Jerez, M.	2007	Procesamiento industrial del arroz y generación de subproductos	Artículo	Subproductos del arroz	UNIANDES
García-Rojas, M., López, J., Torres, A.	2012	Análisis de la adsorción como método de pulimiento...	Artículo	Tratamiento de aguas	Redalyc

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Instituto del Agua	2023	Adsorción: tratamiento innovador...	Boletín técnico	Innovación en tratamiento	Instituto del Agua
Menéndez-Gutiérrez, R.	2022	La sedimentación secundaria en tratamientos biológicos...	Artículo	Tratamiento biológico	Scielo Cuba
Singh, B.	2018	Rice husk ash	Capítulo de libro	Material cementante	Woodhead
Singh, R., & Kumar, P.	2020	Removal of heavy metals from wastewater...	Artículo	Adsorción de metales	ETI
Nhapi, I., Banadda, N., Murenzi, R., Sekomo, C., Wali, U. G.	2011	Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater Using Rice Husks	Artículo	Adsorción con arroz	ResearchGate
Vita, A., Silva, M., Torres, R.	2023	Adsorption of chromium using rice husk ash...	Artículo	Modelado de adsorción	—
Zhang, Y., Li, H., Chen, X.	2021	Adsorption of methylene blue...	Artículo	Activación química	JWPE
Hernández Pérez, R., Olarte Paredes, A., Salgado Delgado, R., et al.	2023	Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha...	Artículo	Nanocelulosa	Scielo México
Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Jaramillo Páez, C. A., Rodríguez Herrera, L. F.	2016	La cascarilla de arroz como alternativa en procesos de descontaminación	Artículo	Descontaminación	Scielo Colombia
Rincón, J., Rincón, S., Guevara, P., et al.	2015	Producción de carbón activado...	Artículo	Tratamiento textil	RACCEFY
Ramírez-Rodríguez, J. C.	2023	Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales...	Artículo	Revisión sector textil	Dialnet
Rodríguez, Y. M., Salinas, L. P., Ríos, C. A., Vargas, L. Y.	2012	Adsorbentes a base de cascarilla de arroz...	Artículo	Industria curtiembre	Scielo Colombia
Palacios-Zambrano, J. J., Vera-Vera, Á. R., Arce-Santana, I. E., et al.	2024	Análisis fisicoquímico de tres variedades de carbón activado...	Artículo	Caracterización	Ingeniar
Décima, S.	2024	Elaboración y evaluación de un filtro purificador de agua casero...	Artículo	Educación ambiental	RTyC

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Resultados, discusión y análisis:

Los resultados obtenidos a partir de la revisión sistemática permiten establecer una visión comparativa sobre la eficiencia, aplicabilidad y comportamiento técnico de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales. A través del análisis de estudios experimentales, se identificaron patrones metodológicos, condiciones operativas óptimas y modelos de adsorción predominantes, así como evidencias territoriales que respaldan su uso en contextos rurales y agroindustriales. Los hallazgos se agrupan en función a:

1. Remoción de metales pesados

La presencia de metales pesados en aguas residuales constituye una de las amenazas más persistentes para la salud humana y los ecosistemas acuáticos, debido a su elevada toxicidad, capacidad de bioacumulación y resistencia a los procesos de degradación natural. Ante esta problemática, numerosos estudios han evaluado la eficacia de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) como adsorbente natural para la eliminación de iones metálicos como plomo (Pb^{2+}), cadmio (Cd^{2+}), arsénico (As^{3+}) y cromo hexavalente (Cr^{6+}), todos ellos comúnmente presentes en efluentes industriales, mineros y agrícolas.

La adsorción se ha consolidado como una alternativa eficiente, económica y ambientalmente sostenible frente a métodos convencionales como la precipitación química, la filtración avanzada o la electrocoagulación. En este contexto, diversos estudios han explorado el uso de subproductos agroindustriales, en particular la cascarilla de arroz y su ceniza, como materiales adsorbentes, tanto en su forma natural como modificada, para la remoción de contaminantes metálicos como cromo, plomo, cadmio y zinc en aguas residuales industriales, demostrando resultados prometedores en términos de capacidad de retención, accesibilidad territorial y compatibilidad con sistemas descentralizados.

Singh y Kumar (2020) realizaron una comparación entre distintos biomateriales, concluyendo que la cascarilla de arroz activada térmicamente presenta una alta capacidad de adsorción para metales pesados, especialmente en condiciones de pH controlado. De manera similar, Nhapi et al. (2011) validaron su eficacia en contextos industriales, destacando su disponibilidad local y bajo costo como ventajas clave para países en desarrollo.

Vita, Silva y Torres (2023) profundizaron en el modelado de la adsorción de cromo, utilizando ceniza de cascarilla de arroz como medio activo. Sus resultados mostraron que los modelos de Freundlich y Langmuir se ajustan adecuadamente a los

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

datos experimentales, lo que permite predecir el comportamiento del sistema en condiciones reales.

Zhang, Li y Chen (2021) complementan esta línea de investigación al demostrar que la activación química con ácido cítrico mejora significativamente la capacidad de adsorción de azul de metileno, lo que sugiere aplicaciones potenciales para metales con estructuras similares.

Por otro lado, Rodríguez, Salinas, Ríos y Vargas (2012) evaluaron la retención de cromo en aguas residuales de la industria curtiembre, utilizando adsorbentes a base de cascarilla de arroz. Su estudio confirma que este residuo agrícola puede ser transformado en un recurso útil para el tratamiento de efluentes altamente contaminantes.

Estos estudios evidencian que la cascarilla de arroz, tanto en su forma natural como modificada, representa una solución viable para la remoción de metales pesados, con aplicaciones en sectores como el textil, el curtiembre y la agroindustria.

Figura 1

Cascarillas de Arroz



Nota. Cascarillas de arroz con tamaños de partícula variables de 45, 75, 106, 180 y 250 μm (a) antes del tratamiento y (b) después del tratamiento (Nhapi, 2011).

2. Adsorción de colorantes y compuestos orgánicos

En el caso de colorantes sintéticos como azul de metileno y rojo Congo, así como fenoles y pesticidas, la RHA activada químicamente (con HCl o NaOH) ha demostrado según evidencia de publicaciones analizadas eficiencias de remoción que oscilan entre 80 % y 95 %, los modelos de Freundlich y Temkin fueron aplicados para describir la heterogeneidad de la superficie adsorbente y la interacción multicapas, resultados que destacan el potencial de la RHA para tratar efluentes industriales con alta carga orgánica (Zhang et al., 2021; Al-Mashhadani et al., 2024).

Colmán (2021) evaluó el uso de cáscara de arroz como adsorbente natural para la remoción del colorante RB222, obteniendo resultados prometedores en términos de

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

capacidad de retención y viabilidad técnica en contextos locales. Complementariamente, Zhang, Li y Chen (2021) demostraron que la activación química de la ceniza de cascarilla de arroz con ácido cítrico mejora significativamente la adsorción de azul de metileno, alcanzando eficiencias superiores en condiciones controladas de pH y temperatura.

García-Rojas, López y Torres (2012) abordaron la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales, destacando su utilidad como etapa final para la remoción de compuestos orgánicos persistentes. En esta misma línea, el Instituto del Agua (2023) resalta la adsorción como una técnica innovadora, especialmente útil en la eliminación de colorantes sintéticos y sustancias orgánicas de difícil biodegradación.

Llanos Páez et al. (2016) propusieron la cascarilla de arroz como alternativa en procesos de descontaminación, enfocándose en su capacidad para retener compuestos orgánicos halogenados y fenoles, típicos de los procesos de acabado textil. Asimismo, Rincón et al. (2015) exploraron la producción de carbón activado a partir de residuos agroindustriales, incluyendo la cascarilla de arroz, y su aplicación en tintorerías, logrando una reducción significativa de la carga orgánica.

Ramírez-Rodríguez (2023) profundiza en el contexto colombiano, señalando que los efluentes textiles contienen colorantes, fenoles, aceites, y otros compuestos orgánicos que presentan baja biodegradabilidad. En este sentido, se recomienda el uso de adsorbentes de bajo costo como materiales lignocelulósicos, entre ellos la cascarilla de arroz, que pueden ser reutilizados en múltiples ciclos con alta eficiencia.

Finalmente, Palacios-Zambrano et al. (2024) realizaron un análisis fisicoquímico de tres variedades de carbón activado de cascarilla de arroz, evidenciando diferencias en la capacidad de adsorción según el tipo de activación y granulometría, lo que permite optimizar su aplicación en sistemas de tratamiento.

Figura 2



Tratamiento Innovador para la Purificación de Aguas Residuales

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Nota. Instituto del Agua (2023)

3. Influencia de las condiciones operativas

La eficiencia de adsorción de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) está fuertemente condicionada por las variables operativas del sistema, las cuales determinan la interacción entre el adsorbente y los contaminantes presentes en la solución, encontrándose entre los parámetros más relevantes el pH, la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto y la temperatura, todos ellos con efectos sinérgicos sobre la capacidad de remoción.

Las condiciones operativas, como el pH, la temperatura, el tamaño de partícula, la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto y la concentración inicial del contaminante, juegan un papel determinante en la eficiencia de los procesos de adsorción aplicados al tratamiento de aguas residuales. Investigaciones han demostrado que la optimización de estos parámetros puede mejorar significativamente la capacidad de remoción de contaminantes, especialmente cuando se emplean materiales como la cascarilla de arroz y su ceniza activada.

Las mismas coinciden en que el pH óptimo para la adsorción de metales pesados y colorantes se sitúa entre 5 y 7, rango en el cual se favorece la ionización de los grupos funcionales presentes en la RHA, como –OH, –COOH y –Si–OH, y se minimiza la competencia con protones en solución (Menéndez-Gutiérrez, 2021; Singh & Kumar, 2020).

Cabe señalar que en medios más ácidos, la superficie del adsorbente tiende a adquirir carga positiva, lo que favorece la atracción electrostática de especies aniónicas, como los colorantes reactivos, por el contrario, a valores de pH elevados, se produce la desprotonación de los grupos funcionales presentes en la RHA, principalmente hidroxilos y carboxilos, lo que puede disminuir significativamente la afinidad por ciertos contaminantes, debido a la reducción de sitios activos disponibles para la adsorción.

La dosis de adsorbente, usualmente comprendida entre 0.5 y 2 g/L, incide directamente en la disponibilidad de sitios activos para la adsorción. En términos generales, un aumento en la dosis conlleva una mayor superficie específica y, por ende, una mayor capacidad total de remoción. Sin embargo, este incremento no siempre se traduce en una mejora proporcional de la eficiencia, ya que puede generarse una saturación prematura del sistema o una disminución relativa en la capacidad de adsorción por efecto de dilución, especialmente cuando la concentración del contaminante es baja (Zhang et al., 2021).

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

El tiempo de contacto, generalmente comprendido entre 30 y 120 minutos, es un parámetro clave que regula el equilibrio entre la velocidad de adsorción y el grado de saturación del material adsorbente. En la mayoría de los estudios revisados, se observa una fase inicial de adsorción rápida, atribuida a la disponibilidad de sitios activos en la superficie de la RHA, seguida por una etapa de estabilización en la que el proceso se ralentiza conforme se alcanza el equilibrio. Este comportamiento sugiere un mecanismo de adsorción predominantemente químico, influenciado por fenómenos de difusión intrapartícula y reacciones superficiales específicas (Vita et al., 2023).

La temperatura, dentro del rango de 25 a 40 °C, constituye un factor relevante en los procesos de adsorción, ya que influye directamente en la cinética de interacción entre el adsorbato y el adsorbente. En condiciones moderadas, se observa un incremento en la movilidad molecular y en la tasa de difusión hacia los poros activos del material, lo que favorece la eficiencia del proceso. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden inducir modificaciones estructurales en la RHA, comprometiendo su integridad fisicoquímica y reduciendo su estabilidad, especialmente en sistemas prolongados o de alta carga térmica.

Singh y Kumar (2020) compararon distintos biomateriales en la remoción de metales pesados, concluyendo que la cascarilla de arroz activada térmicamente alcanza su máxima capacidad de adsorción en condiciones de pH ácido (entre 4 y 6), y que la dosis de adsorbente y el tiempo de contacto son factores críticos para lograr una remoción superior al 90 %.

Palacios-Zambrano et al. (2024), realizaron un análisis fisicoquímico de tres variedades de carbón activado de cascarilla de arroz, evidenciando que la porosidad, la densidad aparente y la capacidad de retención varían según el método de activación y el tipo de arroz utilizado, lo cual sugiere que las condiciones operativas deben adaptarse al tipo de adsorbente para maximizar su rendimiento.

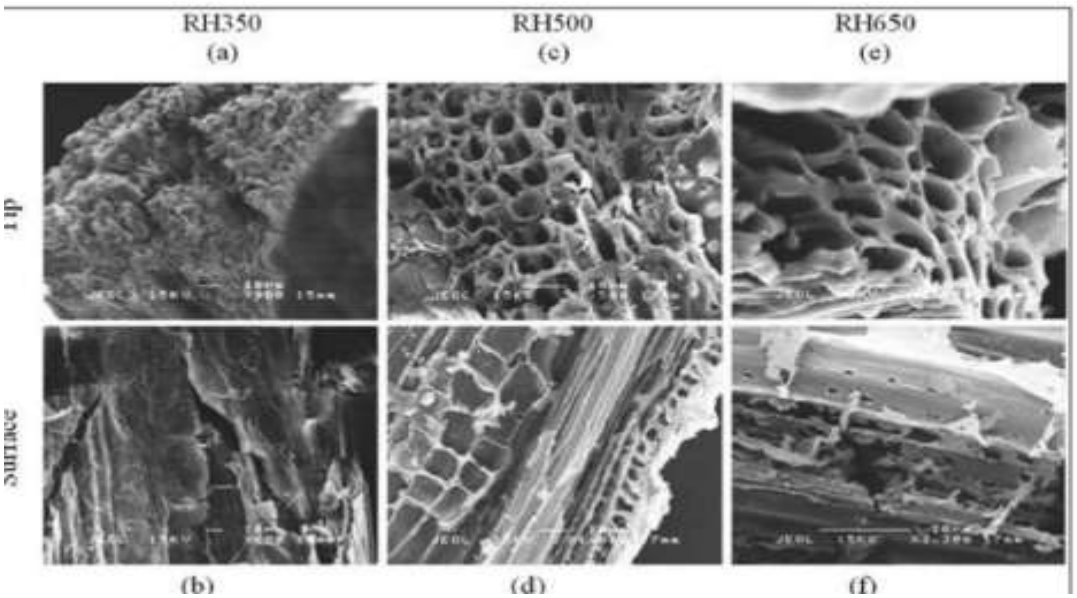
En el caso específico del colorante RB222, evaluado por Colmán (2021), el pH fue el factor más determinante en la eficiencia de remoción. A pH = 2, se alcanzó una remoción máxima del 77 %, atribuida a la interacción electrostática entre la superficie cargada positivamente del adsorbente y el colorante aniónico. Esta condición favorece la atracción de los grupos sulfonato presentes en la molécula del RB222 hacia los sitios activos de la cáscara de arroz tratada. Además, la hidrólisis alcalina previa permitió una mayor exposición de grupos –OH, lo que incrementó la capacidad de adsorción en comparación con las cáscaras no hidrolizadas.

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Por lo tanto, la literatura respalda que la optimización de las condiciones operativas es clave para maximizar el rendimiento de la RHA como adsorbente, y debe ser ajustada según el tipo de contaminante, el tratamiento previo del material y el diseño del sistema de tratamiento.

Figura 3

Imágenes SEM de biocarbón de RHB a temperaturas de pirólisis de 350 °C, 500 °C y 650 °C



Nota: los poros del RHB aumentan conforme incrementa la temperatura; en el caso de la imagen (e), sus poros se ven mucho más grandes comparados con (a). (Singh Karam et al., 2022)

4. Pertinencia territorial y escalabilidad

La ceniza de cáscara de arroz (RHA) se presenta como una solución tecnológica altamente pertinente en contextos rurales y agroindustriales, caracterizados por una alta disponibilidad de biomasa residual y limitaciones estructurales para implementar sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales. En regiones rurales y agroindustriales, la acumulación de cáscara de arroz como subproducto de la agroindustria no solo plantea un desafío ambiental por su volumen y manejo inadecuado, sino que también ofrece una oportunidad estratégica para su valorización a través de aplicaciones en tecnologías limpias.

Estudios como el de Ortega y Ramírez (2022), demuestran que la RHA puede ser integrada en sistemas de tratamiento descentralizados, adaptados a las condiciones locales, con bajo requerimiento energético y alta eficiencia en la remoción de contaminantes. Permitiendo abordar simultáneamente dos problemáticas: la gestión de

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

residuos agroindustriales y la mejora de la calidad del agua en comunidades vulnerables; contribuyendo de esta manera en forma directa a la economía circular, al convertir un residuo abundante como la cáscara de arroz en un insumo funcional para procesos de depuración hídrica, promoviendo así el aprovechamiento territorial de recursos y la reducción de impactos ambientales.

En el caso específico de Paraguay, el estudio de Colmán (2021) aporta evidencia concreta sobre la viabilidad técnica del uso de cáscara de arroz como adsorbente natural. Según datos de la FAO (2020), la producción nacional de arroz superó las 1.069.000 toneladas en 2019, lo que implica la generación de más de 213.000 toneladas de cascarilla. Esta biomasa, actualmente subutilizada, puede ser transformada en material adsorbente mediante tratamientos térmicos o químicos accesibles a escala local.

El enfoque experimental desarrollado por Colmán demuestra que, mediante hidrólisis alcalina y tratamiento ácido, es posible mejorar la capacidad de adsorción de la cáscara de arroz, alcanzando eficiencias de remoción del colorante RB222 superiores al 75 % en condiciones controladas. Aunque la capacidad de adsorción absoluta es moderada, su bajo costo, disponibilidad regional y compatibilidad con sistemas en serie la convierten en una opción viable para etapas finales de tratamiento o para efluentes de baja carga.

Discusión:

La consolidación del uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA) como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales no solo responde a criterios de eficiencia técnica, sino también a principios de sostenibilidad territorial y justicia hídrica, investigaciones como las de García-Rojas et al., (2012) y las de Menéndez-Gutiérrez, (2021), han destacado que la adsorción con materiales lignocelulósicos activados representa una de las tecnologías más prometedoras para contextos con limitaciones estructurales, debido a su bajo costo, accesibilidad y adaptabilidad.

Desde una perspectiva sistémica, la RHA no debe considerarse únicamente como un insumo técnico, sino como un vector de transformación territorial, considerando su implementación en sistemas modulares como filtros comunitarios, unidades de pulimiento o lechos adsorbentes que permiten descentralizar el tratamiento de aguas residuales, reducir la dependencia de tecnologías importadas y fortalecer la resiliencia hídrica local. Esta lógica se alinea con los postulados de la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), que promueve soluciones adaptadas a las condiciones ecológicas, sociales y productivas de cada territorio (UNESCO, 2022).

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Además, la escalabilidad de esta tecnología está directamente vinculada a la capacidad de articulación entre actores; la literatura especializada subraya que los procesos de transferencia tecnológica en el ámbito ambiental requieren no solo validación técnica, sino también apropiación social, formación de capacidades locales y generación de marcos normativos habilitantes (Sánchez-Serrano et al., 2022). En este sentido, el rol de las cooperativas agrícolas y las plantas de procesamiento de arroz es estratégico, ya que concentran tanto el residuo como el conocimiento operativo necesario para su transformación.

Por otro lado, el aprovechamiento de la RHA como adsorbente contribuye a cerrar ciclos productivos en la agroindustria, reduciendo la carga ambiental de los residuos y generando valor agregado en territorios históricamente marginados por las dinámicas extractivas. Esta lógica de economía circular no solo mejora la eficiencia ecológica, sino que también abre oportunidades para la innovación social, la generación de empleo verde y la diversificación de servicios ecosistémicos.

En particular, esta tecnología contribuye directamente al cumplimiento del ODS 6: Agua limpia y saneamiento, que busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos. Dentro de este marco, la meta 6.3 establece la necesidad de mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, el aumento del reciclaje y la reutilización segura de aguas residuales

Finalmente, es necesario reconocer que la consolidación de esta tecnología requiere superar barreras técnicas y normativas, como la estandarización de procesos de activación, la certificación de materiales adsorbentes y la integración de indicadores de desempeño ambiental en los sistemas de monitoreo. La evidencia científica respalda su viabilidad, pero su implementación efectiva dependerá de la capacidad de los territorios para articular conocimiento, recursos y voluntad política en torno a una agenda hídrica inclusiva y sostenible.

Reflexiones finales y/o conclusiones:

La evidencia científica revisada confirma que la ceniza de cáscara de arroz (RHA) constituye una alternativa viable, eficiente y ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en la remoción de metales pesados y colorantes sintéticos, donde su desempeño técnico, respaldado por modelos de adsorción y cinética validados, se complementa con una alta pertinencia territorial en regiones rurales y agroindustriales, lugares en que la disponibilidad del residuo es abundante y las soluciones convencionales resultan inaccesibles.

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Más allá de su eficacia como adsorbente, la RHA representa una oportunidad estratégica para avanzar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribuyendo directamente al ODS 6 al mejorar la calidad del agua mediante tecnologías descentralizadas y adaptadas al territorio; al ODS 12, al fomentar la valorización de residuos agroindustriales dentro de esquemas de economía circular; y al ODS 13, al reducir impactos climáticos asociados al manejo inadecuado de biomasa.

La implementación de sistemas modulares con RHA, articulados entre cooperativas agrícolas, plantas de procesamiento y comunidades rurales, permite democratizar el acceso a soluciones hídricas, fortalecer la resiliencia local y promover la innovación social, no obstante, su escalabilidad dependerá de la capacidad de los territorios para integrar conocimiento técnico, voluntad política y participación comunitaria en torno a una agenda hídrica inclusiva y sostenible.

En función de los hallazgos analizados, se recomienda que futuras investigaciones orientadas al uso de RHA como adsorbente profundicen en la estandarización de procesos de activación, la caracterización fisicoquímica del material bajo condiciones reales de operación y la evaluación comparativa frente a otros biosorbentes disponibles localmente. Asimismo, resulta pertinente incorporar indicadores de desempeño ambiental y social en los estudios de aplicabilidad territorial, con el fin de fortalecer su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y facilitar su integración en políticas públicas de gestión hídrica descentralizada.

Referencias

Al-Mashhadani, M., Al-Saadi, A., & Jassim, H. (2024). Removal of pesticides from wastewater using thermally activated rice husk ash. Arab Journal of Environmental Sciences, 12(1), 45–58. https://doi.org/10.54153/sjpas.2024.v6i3(2).869

Ato Alama, K. M., & Peña Guerrero, K. R. (2022). Aplicación de tecnologías limpias en la agroindustria para el aprovechamiento de sus residuos: una revisión sistemática de los últimos 10 años [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/91603

Chipantaxi Cadena, M., & Molina, J. (2023). Evaluación de la ceniza de cáscara de arroz como adsorbente en aguas residuales. Repositorio Universidad Técnica de Ambato. https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c0518ba8-7b76-452d-b14e-8a741f037a2a/content

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Colmán, N. F. (2021). Evaluación de cáscara de arroz como adsorbente natural para la remoción del colorante RB222 en solución acuosa [Tesis de grado, Universidad Nacional de Pilar]. https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Tesis_Federico_Colm%C3%A1n_Final.pdf

Décima, S. (2024). Elaboración y evaluación de un filtro purificador de agua casero con carbón activado previamente preparado y su reproducción por estudiantes avanzados del nivel secundario. Revista Tecnología y Ciencia, (49), 14–36. https://doi.org/10.33414/rtyc.49.14-36.2024

García Jerez, M. (2007). Procesamiento industrial del arroz y generación de subproductos. Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 8(2), 55–63. https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7bab2158-3d39-443a-9519-7746fad64edc/content

García-Rojas, M., López, J., & Torres, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. Revista Colombiana de Ingeniería Química, 39(1), 23–34. https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894007.pdf

Hernández Pérez, R., Olarte Paredes, A., Salgado Delgado, R., Salgado Delgado, A. M., Medrano, A. S., & Martínez Candia, F. R. (2023). Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha y su conversión en nanocelulosa. Mundo Nano, 16(30), e00059. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69697

Instituto del Agua. (2023). Adsorción: tratamiento innovador para la purificación de aguas residuales. Boletín Técnico del Agua, 15(3), 12–18. https://institutodelagua.es/aguas-residuales/adsorcion-tratamiento-de-aguas-residualesaguas-residuales/

Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Jaramillo Páez, C. A., & Rodríguez Herrera, L. F. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. Producción + Limpia, 11(2), 150–160. https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12

Menéndez-Gutiérrez, R. (2022). La sedimentación secundaria en los tratamientos biológicos de aguas residuales. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 43(3),

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

24–33. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382022000300024&script=sci_arttext

Nhapi, I., Banadda, N., Murenzi, R., Sekomo, C., & Wali, U. G. (2011). Removal of heavy metals from industrial wastewater using rice husks. The Open Environmental Engineering Journal. https://www.researchgate.net/publication/267846041_Removal_of_Heavy_Metals_from_Industrial_Wastewater_Using Rice_Husks

Palacios-Zambrano, J. J., Vera-Vera, Á. R., Arce-Santana, I. E., Lucero-Álvarez, M. G., Barzola-Miranda, S. E., & Gutiérrez-Lara, V. E. (2024). Análisis fisicoquímico de tres variedades de carbón activado de cascarilla de arroz. Revista INGENIAR, 7(13). https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/181/259

Ramírez-Rodríguez, J. C. (2023). Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión. Informador Técnico, 87(1), 82–106. https://doi.org/10.23850/22565035.5304

Rincón, J., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 39(151), 171–175. https://doi.org/10.18257/raccefyn.138

Rodríguez, Y. M., Salinas, L. P., Ríos, C. A., & Vargas, L. Y. (2012). Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 10(1), 146–156. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000100017

Singh, B. (2018). Rice husk ash. En R. Siddique & P. Cachim (Eds.), Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete (pp. 417–460). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00013-4

Singh, R., & Kumar, P. (2020). Removal of heavy metals from wastewater using rice husk ash: A comparative study. Environmental Technology & Innovation, 17, 100583. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100583

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial

Vita, A., Silva, M., & Torres, R. (2023). Adsorption of chromium using rice husk ash: Experimental and modeling approaches. Journal of Hazardous Materials Advances, 5, 100123.

Zhang, Y., Li, H., & Chen, X. (2021). Adsorption of methylene blue from aqueous solution using chemically activated rice husk ash. Journal of Water Process Engineering, 40, 101900. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101900

Los trabajos publicados en esta revista están bajo la licencia Creative Commons Atribución – No comercial