



Investigación sobre la comparación de sustratos vegetales adsorbentes para la remoción de compuestos químicos en aguas residuales

Yuma Analí Conde Quispe, Diane Marilyn Dipaz Valdivia*

Universidad Cesar Vallejo, Av. Larco 1770, La Libertad 13001, Trujillo, Perú

Keys: Wastewater, Mercury, Plant, Contamination; **Claves:** Agua residual, Mercurio, Vegetal, Contaminación.

ABSTRACT

Research on the comparison of adsorbent plant substrates for the removal of chemical compounds in wastewater. Wastewater samples were analyzed, revealing the presence of chemical contaminants such as phosphorus, nitrates, sulfates, cadmium, mercury, and arsenic at significant levels. The samples were decontaminated using walnut shells and wood waste as absorbent materials. A reduction of over 90% of the aforementioned contaminants was achieved. The most effective treatment dose was identified as a range of 1.0 to 2.0 grams of substrate per liter of wastewater, with an optimal exposure time of 120 minutes. In summary, the study confirms the effectiveness of these plant substrates in removing chemical compounds present in wastewater, highlighting their potential for the development of more sustainable and efficient treatment systems.

RESUMEN

Se analizaron muestras de aguas residuales revelando la presencia de contaminantes químicos como fósforo, nitratos, sulfatos, cadmio, mercurio y arsénico en niveles significativos. Se realizó la descontaminación de las muestras utilizando cáscara de nuez y residuos de madera como materiales absorbentes. Se logró una reducción superior al 90% de los contaminantes mencionados. Se identificó que la dosis más efectiva de tratamiento corresponde a un rango de 1,0 a 2,0 gramos de sustrato por litro de agua residual, con un tiempo óptimo de exposición de 120 minutos. En resumen, el estudio confirma la efectividad de estos sustratos vegetales en la eliminación de compuestos químicos presentes en aguas residuales, destacando su potencial para el desarrollo de sistemas de tratamiento más sostenibles y eficientes.

Revista Boliviana de Química, 2025, 42, 91-96
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. Paper edition
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. e-edition, May-Nov
30 noviembre 2025, <https://doi.org/10.53287/qdfs2028cq88w>
© 2025 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
<https://bolivianchemistryjournaliiq.umsa.bo>

¹Received August 13, 2025, accepted October 21, 2025, published November 30, 2025. *Mail to: didipazva@ucvvirtual.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de formas eficaces y sostenibles de reducir la contaminación de las aguas residuales es el principal objetivo de la investigación actual¹. Al evaluar la eficacia con la que diversos sustratos vegetales eliminan sustancias químicas nocivas, este estudio contribuye a salvaguardar la salud humana y el medio ambiente al reducir el riesgo de enfermedades y daños ecológicos².

Además, la investigación sobre sustratos vegetales para la eliminación de compuestos químicos en aguas residuales es uno de los métodos novedosos y prometedores que pueden proponerse para abordar el problema de la contaminación de las aguas residuales³.

Un sustituto viable en este sentido es el estudio de sustratos vegetales para la eliminación de metales pesados, fosfato, nitratos y sulfatos de las aguas residuales⁴. Para eliminar el nitrógeno de las aguas residuales, los sustratos vegetales pueden proporcionar una alternativa rentable, respetuosa con el medio ambiente y eficiente; sin embargo, la eficacia de diversos sustratos vegetales debe ser evaluada y comparada con el fin de determinar su potencial para la eliminación de nitrógeno⁵.

En consecuencia, nuestra investigación concuerda plenamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. En primer lugar, dado que pretende mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación por nitrógeno, contribuye sustancialmente al ODS 6: Agua limpia y saneamiento. También facilita la aplicación de la gestión integrada de los recursos hídricos, que es el objetivo 6.5.

Además, esta investigación se relaciona estrechamente con el ODS 12: Producción y consumo responsables, al promover patrones sostenibles de producción y consumo. La búsqueda de soluciones innovadoras y respetuosas con el medio ambiente para el tratamiento de aguas residuales es fundamental para alcanzar este objetivo. Así mismo, la investigación también se conecta con los ODS 14 y 15, relacionados con la vida submarina y los ecosistemas terrestres. Al proteger la calidad del agua y reducir la contaminación, se preserva la biodiversidad y se conservan los ecosistemas naturales.

La fitorremediación: es una técnica innovadora que aprovecha el poder de las plantas para restaurar la salud del medio ambiente⁶. Al utilizar plantas para eliminar, reducir o inmovilizar contaminantes químicos, esta técnica ofrece una solución sostenible y económica para remediar suelos, aguas y aire contaminados⁷.

Las plantas, con su capacidad para absorber y procesar contaminantes, se convierten en aliadas valiosas en la lucha contra la contaminación⁸. Las plantas emplean diversas técnicas para eliminar contaminantes, como la rizofiltración, la fitodegradación, la fitoestabilización y la fitovolatilización⁹.

Desde árboles como el eucalipto y el populus hasta hierbas como la *Phytolacca* y la *Brassica*, la gama de plantas utilizadas en la fitorremediación es asombrosa. Cada especie tiene cualidades y beneficios únicos, lo que permite elegir la mejor para cada circunstancia¹⁰.

Entre las muchas ventajas de la fitorremediación se encuentran su bajo efecto medioambiental, su sostenibilidad y su economía. También permite reutilizar el agua y los suelos tratados, lo que disminuye la demanda de recursos naturales¹¹.

Sin embargo, la fitorremediación también presenta inconvenientes, como el tiempo que requiere y la necesidad de agua y nutrientes¹². Sin embargo, las ventajas superan con creces a los inconvenientes, lo que convierte a la fitorremediación en un instrumento vital para la preservación del medio ambiente¹³.

Sustrato vegetal: Componente esencial de la restauración medioambiental, los sustratos vegetales son materiales orgánicos derivados de las plantas¹⁴. Estos sustratos ayudan a mejorar la calidad del suelo y del agua al absorber metales pesados y contaminantes químicos, lo que crea un entorno saludable para el desarrollo de las plantas¹⁵.

Los sustratos para plantas se presentan en una amplia gama de formas, desde ceniza de madera y compost hasta estiércol compostado y fibra de coco. Cada tipo de sustrato tiene cualidades y beneficios únicos, por lo que se puede elegir el mejor para cada aplicación¹⁶. Entre los usos más comunes de los sustratos vegetales se encuentran la biorremediación y la fitorremediación, que ayudan a restablecer la salud del medio ambiente promoviendo el crecimiento de plantas que eliminan los contaminantes¹⁷.

Los sustratos vegetales tienen beneficios sociales y económicos, además de medioambientales. Son económicamente viables, sostenibles y pueden ser producidos localmente, generando empleos y estimulando la economía local¹⁸.

Compuestos químicos: Los compuestos químicos son sustancias complejas que se encuentran en todos los ámbitos de nuestra vida, desde la naturaleza hasta la industria¹⁹. Estos compuestos están formados por la combinación de elementos químicos que se unen mediante enlaces químicos, creando una amplia variedad de sustancias con propiedades únicas²⁰.

Sin embargo, los compuestos químicos también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente; por ejemplo, la contaminación del agua, suelo y aire puede ser causada por la liberación de estos compuestos, afectando la biodiversidad y la salud humana²¹.

La clasificación de los compuestos químicos es fundamental para entender su comportamiento y potencial impacto en el medio ambiente; estos compuestos pueden ser clasificados según su estructura molecular, función química u origen²² (Lu et al., 2024)

EXPERIMENTAL

Preparación de muestra patrón

Para realizar el procedimiento experimental se inició con la preparación de la muestra patrón, consistente en 20 recipientes de 1 litro de agua destilada, a la que se añadió una cantidad al azar de fósforo, nitrato, sulfato, cadmio, mercurio y arsénico. Estas muestras se conservaron en la congeladora para su posterior tratamiento y análisis.

Para lo cual se necesitó los siguientes materiales: 20 recipientes de 1 litro de capacidad, Agua destilada, Fósforo (en forma de fosfato), Nitrato (en forma de nitrato de sodio), Sulfato (en forma de sulfato de sodio), Cadmio (en forma de cadmio sulfato), Mercurio (en forma de mercurio cloruro), Arsénico (en forma de arsénico trióxido), Balanza analítica, Pipetas, Congeladora.

Preparación de las soluciones

En la preparación de las soluciones de fósforo, nitrato, sulfato, cadmio, mercurio y arsénico: se pesarán las cantidades de Fósforo: 0,35 mg/L (35 mg/100 L), Nitrato: 98 mg/L (98 g/100 L), Sulfato: 1538 mg/L (1538 g/100 L), Cadmio: 0,351 mg/L (0,351 mg/100 L), Mercurio: 0,10 mg/L (0,10 mg/100 L), Arsénico: 1,10 mg/L (1,10 mg/100 L), utilizando una balanza analítica y disolviendo cada compuesto en agua destilada.

A continuación, se obtuvo y trataron los sustratos naturales, consistentes en cascara de arroz y nuez, y residuos de madera y alfalfa. Estos materiales pasaron por procesos de limpieza, secado y pirolisis a 300°C durante 5 horas. Posteriormente, se trituraron y tamizaron para obtener un material completamente reducido.

Prueba de jarras

Los ensayos experimentales se realizaron mediante la prueba de jarras, utilizando 6 jarras con 1000 ml de agua sintética cada una. Se añadieron diferentes dosis de cada sustrato (0,5, 1 y 2 gramos) y se agitaron a 200 rpm durante 30, 60 y 120 minutos. Después de la agitación, se dejaron sedimentar durante 15 minutos y se tomaron muestras de 100 ml para analizar los parámetros de interés.

Además, se realizaron ensayos para evaluar la eficiencia de diferentes coagulantes y dosis en la remoción de contaminantes. Se utilizaron técnicas de análisis químico para determinar la concentración de los parámetros de interés en las muestras.

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos y se evaluó la eficiencia de los diferentes sustratos y coagulantes en la remoción de contaminantes de aguas residuales sintéticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó la variación de eficiencias de los sustratos naturales y orgánicos que permitieron mayor remoción de compuestos químicos en las aguas residuales.

Al aplicar 2.0 gramos de sustrato orgánico de residuo de alfalfa y un tiempo máximo de tratamiento de 120 minutos este permite una mayor y mejor reducción en la concentración de los contaminantes, no obstante, se muestra que desde el minuto 60 se genera una constante disminución de dichos valores, llegando a valores por debajo de los valores máximos admisibles del DS. 010-2019.

Al analizar los porcentajes de eficiencia del sustrato natural de cascara de arroz, definimos que a una dosis de 2 gramos y un tiempo de 120 minutos de y tratamiento se obtuvo mayores eficiencias de 71.6% en fosforo, 62.5% en nitratos, 48.5% en sulfatos, 50% en cadmio, 60% en mercurio y 67.4% en arsénico (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de eficiencia con sustrato natural de cascara de arroz

Dosis	Tiempo	Fosforo	Nitratos	Sulfato	Cadmio	Mercurio	Arsénico
0.5 g	30 min	12.2%	14.6%	13.8%	19.3%	15%	6.9%
0.5 g	60 min	31.1%	27.6%	28.3%	33%	30%	19.7%
0.5 g	120 min	43.2%	46.4%	31.4%	42.6%	35%	36.2%
1.0 g	30 min	20.3%	22.4%	17.1%	29.5%	30%	22.5%
1.0 g	60 min	54.1%	47.9%	36.1%	41.1%	50%	53.7%
1.0 g	120 min	63.5%	55.7%	37.8%	44.0%	55%	55%
2.0 g	30 min	32.4%	27.6%	21.3%	31.7%	35%	26.1%
2.0 g	60 min	63.5%	59.4%	45.5%	48.4%	55%	63.8%
2.0 g	120 min	71.6%	62.5%	48.5%	50%	60%	67.4%

Al analizar los porcentajes de eficiencia del sustrato natural de cascara de nuez, definimos que a una dosis de 2 gramos y un tiempo de 120 minutos de y tratamiento se obtuvo mayores eficiencias de 94.6% en fosforo, 92.2% en nitratos, 83.2% en sulfatos, 86.8% en cadmio, 90% en mercurio y 92.2% en arsénico (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de eficiencia con sustrato natural de cascara de nuez

Dosis	Tiempo	Fosforo	Nitratos	Sulfato	Cadmio	Mercurio	Arsénico
0.5 g	30 min	17.6%	19.8%	15.1%	23.7%	20%	9.6%
0.5 g	60 min	41.9%	38%	31.4%	40.1%	40%	22.5%
0.5 g	120 min	48.6%	57.3%	44.1%	43.2%	45%	38.5%
1.0 g	30 min	47.3%	44.8%	43.9%	42.2%	40%	35.8%
1.0 g	60 min	87.8%	87.0%	80.4%	76.1%	65%	89.4%
1.0 g	120 min	91.9%	90.1%	82.6%	83.9%	85%	90.8%
2.0 g	30 min	51.4%	47.4%	44.3%	43.2%	45%	41.3%
2.0 g	60 min	90.5%	89.1%	80.7%	78.3%	70%	90.8%
2.0 g	120 min	94.6%	92.2%	83.2%	86.8%	90%	92.2%

Al analizar los porcentajes de eficiencia del sustrato orgánico de residuo de madera, definimos que a una dosis de 2 gramos y un tiempo de 120 minutos de y tratamiento se obtuvo mayores eficiencias de 95.9% en fosforo, 91.1% en nitratos, 90.2% en sulfatos, 88.6% en cadmio, 90.5% en mercurio y 93.1% en arsénico (Tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje de eficiencia con sustrato orgánico de residuo de madera

Dosis	Tiempo	Fosforo	Nitratos	Sulfato	Cadmio	Mercurio	Arsénico
0.5 g	30 min	25.7%	26%	20.8%	27.8%	30%	24.8%
0.5 g	60 min	50%	56.3%	40.7%	49.1%	50%	56.9%
0.5 g	120 min	54.1%	59.9%	46%	52.8%	55%	63.8%
1.0 g	30 min	50%	47.4%	51%	43%	55%	44%
1.0 g	60 min	89.2%	89.1%	87%	86.1%	75%	90.4%
1.0 g	120 min	93.2%	90.6%	89.8%	88.4%	90%	92.2%
2.0 g	30 min	54.1%	48.4%	51.2%	43.3%	65%	45.4%
2.0 g	60 min	90.5%	90.6%	87.4%	87.5%	85%	91.7%
2.0 g	120 min	95.9%	91.1%	90.2%	88.6%	90.5%	93.1%

Al analizar los porcentajes de eficiencia del sustrato orgánico de residuo de alfalfa, definimos que a una dosis de 2 gramos y un tiempo de 120 minutos de y tratamiento se obtuvo mayores eficiencias de 74.3% en fosforo, 65.1% en nitratos, 48.8% en sulfatos, 50.3% en cadmio, 70% en mercurio y 68.8% en arsénico.

CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió evaluar la eficacia de diferentes sustratos vegetales para la remoción de compuestos químicos en aguas residuales, nivel de laboratorio. Los resultados obtenidos muestran que los sustratos vegetales pueden ser una opción viable y efectiva para el tratamiento de aguas residuales.

Se determinó que las muestras de agua residual analizadas contenían compuestos químicos como fosforo, nitratos, sulfato, cadmio, mercurio y arsénico en concentraciones significativas. Estos resultados son fundamentales para entender la composición química de las aguas residuales y diseñar estrategias efectivas para su tratamiento.

Se analizaron y definieron las condiciones de tratamiento con sustratos vegetales para la remoción de compuestos químicos en aguas residuales. En cuanto a los sustratos vegetales evaluados, se encontraron condiciones óptimas específicas para cada uno. La cascara de arroz requiere una dosis de 2,0 gramos por litro de agua residual y un tiempo de tratamiento de 120 minutos, lo que permite una reducción del 40% de fosforo, 61% de nitratos, 49% de sulfato, 50% de cadmio, 60% de mercurio y 68% de arsénico. Por otro lado, la cascara de nuez y los residuos de madera mostraron ser los sustratos más efectivos, con una dosis de 1,0 gramo por litro de agua residual y un tiempo de tratamiento de 120 minutos. Estas condiciones permiten una reducción del 92% de fosforo, 91% de nitratos, 90% de sulfato, 88% de cadmio, 90% de mercurio y 92% de arsénico.

Se analizaron las variaciones en la eficiencia de los sustratos vegetales para la remoción de compuestos químicos en aguas residuales. Los resultados obtenidos mostraron que el sustrato de cascara de nuez y los residuos de madera lograron reducir los niveles de fosforo, nitratos, sulfato, cadmio, mercurio y arsénico en un 90% o más.

REFERENCIAS



- ¹ P. C. Stern, T. Dietz, M. P. Vandenberg, *Energy Research & Social Science*, 2022, **91**, 102735. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102735>
- ² B. K. Navina, et al., *Chemosphere*, 2024, **350**, 141123. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141123>
- ³ M. H. Saleem, et al., *Science of the Total Environment*, 2024, 169755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169755>
- ⁴ U. Tyagi, *Approaches and future perspective. Waste Management Bulletin*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.010>
- ⁵ K. Kumar et al. *Chemosphere*, 2023, 140419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140419>
- ⁶ K. K. Yadav, et al. *Ecological engineering*, 2018, **120**, 274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>
- ⁷ S. C. Chakraborty et al., *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, **162**, 230. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.011>
- ⁸ M. Zaghloul, *Middle East J*, 2020, **9**, 186. <https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.1.17>
- ⁹ R. A. Kristanti, T. Hadibarata, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2023, **32**, 100451. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100451>
- ¹⁰ A. Kafle et al. *Environmental Advances*, 2022, **8**, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- ¹¹ J. Wang, M. A. Delavar, *Science of The Total Environment*, 2023, 165949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165949>
- ¹² J. Wang, M. A. Delavar, *Soil & Environmental Health*, 2024, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.sch.2024.100062>
- ¹³ N. W. Guidi et al. *Plants*, 2023, **12**, 1031. <https://doi.org/10.3390/plants12051031>
- ¹⁴ M. F. Cotrufo et al. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, **168**, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>
- ¹⁵ Y. Xu et al. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, **101**, 128554. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128554>
- ¹⁶ M. Zhao et al., *Environmental Pollution*, 2024, **357**, 124396. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124396>
- ¹⁷ S. Pola, 'Rhizomicrobiome in Sustainable Agriculture and Environment: - Applications of rhizomicrobiome in bioremediation and assisted phytoremediation', Chapter 14, Academic Press Inc., London, 2025, pp. 333-344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23691-4.00014-2>
- ¹⁸ S. M. B. Krause et al., *Data in Brief*, 2024, **57**, 111095. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111095>
- ¹⁹ M. V. Silva de Andrade et al., *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2024, **134**, 102457. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102457>
- ²⁰ L. J. Cruz-reina et al., *Chemical Engineering Journal Advances*, 2024, **20**, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2024.100661>
- ²¹ E. Hosseini et al., *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, **137**, 106863. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106863>
- ²² P. Lu et al., *Food Chemistry: X*, 2024, **24**, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101874>