

Uso de biomateriales en comunidades rurales

S. Orozco ^{a*}, E. Montiel ^b, L.B. López-Sosa ^c, M. Rivero ^d

^a Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. V1, Ciudad Universitaria, Morelia, 58190, Michoacán, México

^b Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 62715, Xalostoc, Ayala, Morelos, México

^c Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio km 3, Pátzcuaro C.P. 61614, México

^d Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Morelia, 58190, Michoacán, México

ABSTRACT

The development of biomaterials from waste is an interesting alternative for the utilization and valorization of agro-industrial waste materials. In this work, natural and activated bioadsorbents are synthesized from avocado (ANB and AAN), mango (MNB and MAB), and orange (ONB and OAB) waste. The activated biomaterials were synthesized by a thermochemical process, using different activating agents (H₃PO₄, ZnCl₂, and NaOH) and heat treatment at 600 °C for 3 h. The synthesized biomaterials have functional groups that allow the adsorption of organic contaminants (dyes, pharmaceuticals compounds, and organic matter) and heavy metals, achieving removal rates of 90-95% using high concentrations of pollutants (above the values identified in domestic and industrial wastewater). In addition, the materials exhibit excellent surface properties and thermal and chemical stability, allowing the biomaterials to be applied in other areas. The biomaterials synthesized from avocado (AAB) and mango (MAB) were applied for the post-treatment of treated water at the San Francisco Pichátaro Wastewater Treatment Plant in Michoacán. The results show that biomaterials are highly effective in removing organic matter, achieving a removal rate of 90-95% of total organic carbon. This indicates that it could be a sustainable technology with potential for use in rural communities to improve the quality of treated water or to remove contaminants present in aquifers.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 20 Octubre, 2025

Revisado 05 Diciembre, 2025



Aceptado 30 Diciembre, 2025

KEYWORDS

Waste biomass, Biomaterials, Remediation, Pollutant, Heavy metals, Applications in WWTP.

Introducción

En los últimos años, los materiales carbonosos han cobrado gran relevancia para aplicaciones de remediación ambiental, como

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Sayra Orozco  sayra.orozco@umich.mx  Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. V1, Ciudad Universitaria, Morelia, 58190, Michoacán, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/mak9dp38>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

adsorbentes de contaminantes orgánicos e inorgánicos, y de metales pesados [1-3]. Los materiales carbonosos obtenidos a partir de materiales residuales biomásicos agrícolas, forestales y agroindustriales son una alternativa emergente para su aprovechamiento y valorización [3]. La gestión integral de materiales residuales es uno de los grandes retos en Michoacán, ya que uno de los sectores productivos más importantes son el agrícola y forestal, generando miles de toneladas diarias de excedentes de cosechas y manejo de bosques, y materiales residuales agroindustriales como semilla y piel de aguacate y mango, aserrín, entre otros [4]. En el marco de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [5] y la Ley General de Economía Circular en México [6], el aprovechamiento y la valorización de estos materiales es crucial y traería consigo beneficios económicos y ambientales [2-3].

Biomateriales

Los materiales carbonosos se pueden clasificar como biomateriales naturales y activados. Los biomateriales naturales son sintetizados por procesos fáciles y de bajo costo, que involucran principalmente secado y molienda, y que permiten la utilización de sistemas solares de baja temperatura [2-3]. Mientras que, los biomateriales activados son altamente porosos con una gran superficie [3]. Estos materiales se pueden sintetizar mediante procesos térmicos o termoquímicos [7]. En el proceso térmico, el material se carboniza a una temperatura de entre 300 y 400 °C. Por otro lado, el proceso termoquímico implica el uso de un agente activador antes de la carbonización y un proceso térmico de 550 a 800 °C. La elección del agente activador es crucial, ya que influye en el rendimiento y la aplicación del carbón activado. Los agentes activantes que se han empleado son hidróxidos alcalinos (NaOH y KOH) [8], ácido fosfórico (H_3PO_4) [9], cloruro de zinc ($ZnCl_2$) [1,3], carbonato de potasio (K_2CO_3), sales de Fe [10], entre otros.

En el presente trabajo, se sintetizan biomateriales naturales y activados a partir de la valorización de la piel y la semilla, subproductos de la agro industrialización de aguacate y mango en el estado de Michoacán y de naranja en el estado de Veracruz. Los biomateriales naturales y activados fueron caracterizados térmica, fisicoquímica y morfológicamente, y aplicados en la remoción de contaminantes presentes en agua tratada en PTAR en comunidades purépechas, en mantos acuíferos de Veracruz y metales pesados como plomo en Coahuila. El desarrollo de biomateriales adsorbentes naturales o activados no sólo representa una alternativa para el aprovechamiento y valorización de materiales biomásicos residuales, sino que ofrece la posibilidad de mejorar la calidad de agua por la remoción de los contaminantes y con la posibilidad de optimizar el uso del recurso hídrico. Además, este proyecto desarrolla una tecnología asequible a las comunidades como una alternativa para su incorporación en PTAR y/o para uso propio.

El acceso a agua de calidad es uno de los retos más importantes en todo el mundo [11]. Según la ONU-OMS, el 80 % de las aguas residuales tratadas no se reutilizan ya que carecen de la calidad adecuada [12]. En este trabajo, nos centraremos en la remoción de contaminantes presentes en aguas tratadas para su reutilización en las comunidades [3], recuperación de mantos acuíferos contaminados por hidrocarburos, resultado de fugas de combustibles y transporte marítimo afecta manglares y arrecifes [13-14], colorantes [8-9], y por metales pesados [15], provenientes de la industria minera. La presencia de estos contaminantes en agua tiene efectos nocivos a la salud de la población y a su potencial como de los ecosistemas por su carácter recalcitrante a procesos convencionales y su potencial para bioacumularse. Ante este desafío, el desarrollo de tecnologías para post tratamiento de agua tratada o la recuperación de mantos acuíferos es crucial para alcanzar los ODS.

El tratamiento y post-tratamiento de agua contaminadas empleando biomateriales adsorbentes, sintetizados a partir de residuos agroindustriales, es alternativa interesante, ya que no produce compuestos intermediarios que resulten más tóxicos que el contaminante inicial, es un proceso de bajo costo y su disposición puede ser conducida por proceso térmicos o biológicos.

Bioadsorción

El proceso de bioadsorción es un proceso ampliamente utilizado para eliminar contaminantes de medios acuosos, que se basa en la interacción entre una sustancia, conocida como adsorbato, y la superficie de un material bioadsorbente en la interfaz entre las dos fases. El mecanismo general contempla cuatro etapas: (I) transporte, en el que las partículas de adsorbato se desplazan desde

la fase fluida a la fase sólida, por convección, dispersión axial o difusión; (II) transferencia de adsorbato a la superficie del bioadsorbente; (III) transferencia de masa, el adsorbato se adhiere a la superficie del bioadsorbente; y (IV) difusión intra-partícula, con el soluto difundiendo a través de los poros del bioadsorbente [16]. De acuerdo con el tipo de interacción entre el adsorbato y el bioadsorbente, se dan dos tipos de adsorción: física y química [3,16].

- Adsorción física se produce a través de fuerzas débiles, como los enlaces de Van der Waals, las interacciones electrostáticas, los enlaces dipolo-dipolo y los enlaces de hidrógeno, entre otros. Este proceso es reversible por naturaleza y tiene valores de entalpía moderados. En este caso, las moléculas o partículas adsorbidas tienen cierta libertad de movimiento sobre la superficie del adsorbente.
- Adsorción química, el adsorbato se une químicamente con la superficie del adsorbente, lo que hace que esta interacción sea irreversible y tenga una entalpía significativamente mayor que la adsorción física. El orden de las entalpías de unión para las diferentes interacciones que puede sufrir un adsorbato en un adsorbente es el siguiente: fuerza de van der Waals < fuerza hidrofóbica < fuerza dipolar < enlace de hidrógeno < enlace químico.

Factores que influyen en la Bioadsorción

En el proceso de adsorción, el pH, la concentración del contaminante y del adsorbente, y la temperatura tienen una influencia en la eficacia del proceso [3,16].

- El pH influye en la carga superficial del adsorbente y en la ionización del contaminante.
- Concentración del adsorbente, un incremento de esta aumenta los sitios de adsorción disponibles, mejorando el porcentaje de remoción del contaminante.
- Concentración de adsorbato, al aumentar la concentración inicial del contaminante (adsorbato) manteniendo la dosis de adsorbente fija, el porcentaje de remoción del contaminante disminuye, debido a la mayor competencia por los sitios activos limitados.
- La temperatura es un factor clave en los procesos químicos, incluyendo tanto el equilibrio como la velocidad de bioadsorción.

Modelamiento del proceso de Bioadsorción

El estudio de la cinética de adsorción proporciona información sobre el mecanismo de adsorción y los fenómenos de transferencia de materia extra e intra-partícula que pueden controlar la velocidad de adsorción, lo que afecta a la eficiencia del proceso. Los modelos cinéticos para describir el proceso de adsorción en una solución acuosa más empleados en la literatura son de pseudo-primer y segundo orden [2,3].

Mientras que, el modelamiento del proceso de adsorción, a temperatura constante es valioso para diseñar procesos de adsorción y optimizar el uso de adsorbentes. Los modelos más empleados para evaluar la capacidad máxima de adsorción del bioadsorbente son los de Freundlich y Langmuir [2].

Metodología

Reactivos

Para la síntesis de los biomateriales activados se emplearon H_3PO_4 , $ZnCl_2$ y $NaOH$. Como contaminantes modelos se emplearon Rodamina B (RhB, $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$, 99,9%), Azul de Metileno (AM, $C_{16}H_{18}ClN_3SxH_2O$, 99%), y cloruro de plomo (Pb, $PbCl_2$). El ajuste del pH se realizó con ácido nítrico (HNO_3 , conc. 60-66%) e hidróxido de potasio (KOH, 85%). Todos los productos químicos se adquirieron de Merck como reactivos de grado A.C.S. y sin purificación adicional.

Síntesis de biomateriales a partir de residuos agrícolas

Los materiales residuales de semilla y piel de mango, aguacate y naranja se recolectaron y se lavaron para eliminar el exceso de pulpa y minimizar el crecimiento de microorganismos. Una vez lavados, los materiales se cortaron en trozos de aproximadamente

1×1 cm, seguido de un proceso de secado en un horno a 50 °C durante 72 h y trituración en un molino eléctrico. A continuación, los biomateriales pulverizados se tamizaron utilizando una malla de 410 µm, obteniéndose biomateriales naturales.

Los biomateriales naturales fueron activados químicamente empleando los precursores químicos H₃PO₄, ZnCl₂ y NaOH. Para la síntesis se mezclaron en relación masa iguales de biomaterial natural (es decir por separado los polvos de mango, aguacate y naranja) y agente activante. Una vez que se obtuvo una mezcla homogénea, los biomateriales se pirolizaron a 650°C durante 3 h, en atmósfera inerte, resultando biomateriales activados de aguacate, mango y naranja. Finalmente, los biomateriales naturales y activados, a partir de semillas y piel de aguacate, mango y naranja, se lavaron con agua desionizada (pH neutro), se secó (105 °C durante 2 h) y se etiquetó como bioadsorbentes naturales y activados a partir de la piel y semilla de aguacate (BNA y BAA), mango (BNM y BAM) y naranja (BNN y BAN), respectivamente. Estos biomateriales se caracterizaron y evaluaron como bioadsorbentes para la remoción del colorante RhB y AM, el metal pesado Pb y para post-tratar agua tratada de una PTAR.

Caracterización de biomateriales a partir de residuos agrícolas

Los biomateriales a partir de residuos de aguacate BNA y BAA, mango BNM y BAM y naranja BNN y BAN fueron caracterizados análisis termogravimétrico (TGA, Perkin Elmer STA 6000, usando N₂ a 30 cm³/min, de 25-850 °C a 10°C/min), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, Thermo Scientific Nicolet iS10 FTIR Espectrofotómetro ajustado con un accesorio Thermo Scientific Smart iTR™ ATR), difracción de rayos X (XRD, Bruker D2-Phaser difractorómetro usando una fuente de radiación CuK α a 30 kV y 10 mA), espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS, Microprobe PHI 5000 VersaProbe II, con una fuente de rayos-X Al K α , $h\nu = 1486.6$ eV), espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, iCAP Qc Model, Thermo Scientific) y microscopía electrónica de barrido (SEM, Microscopio JEOL JSM IT300). Para analizar la capacidad de adsorción de los biomateriales naturales y activados se empleó un sistema de mezclado perfecto batch y una columna de adsorción continua. Las condiciones experimentales se fijaron a un valor de pH, concentración de bioadsorbente y de adsorbato, las cuales se evaluaron como óptimas en trabajos preliminares.

Resultados y Discusión

Caracterización fisicoquímica, morfológica y estructura

La composición química de los biomateriales naturales, a partir de residuos de aguacate (BNA) se evaluó por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Los resultados demuestran la presencia de Mg (2.3-3.3 mg/L), P (3.5-8.3 mg/L), K (39-143 mg/L), Ca (0.16-0.8 mg/L) y Zn (0.28-0.94 mg/L) [2]. El contenido de humedad de los residuos de aguacate es de 24-32%, materia volátil, 67%, carbón fijo de 0.7-3.6% y ceniza de 0.28-7.9% [2]. Estos parámetros fueron evaluados de acuerdo con la NOM [17]. El análisis térmico de los biomateriales naturales se realizó por termogravimetría, los resultados revelan que los biomateriales naturales BNA, BNM y BNN tiene una estabilidad térmica hasta los 250°C, por encima de esta temperatura se observa la degradación de biomaterial. Al activar (H₃PO₄, ZnCl₂ y NaOH) y pirolizar los biomateriales BAA, BAM y BAN, la estabilidad térmica se incrementa hasta los 550-600°C, lo que ofrece una posibilidad para su uso otras aplicaciones que operen temperaturas altas [1-3,9,14-15].

En análisis de grupos funcionales se realizó por Espectroscopía IR, los biomateriales naturales BNA, BNM y BNN presentan bandas a: 3000-2820 cm⁻¹ asignada al estiramiento simétrico de C-H sp³, 1726 cm⁻¹ relacionada con el C=O del grupo éster, 1600 cm⁻¹ a las vibraciones del grupo carbonilo C=O, 1200-1059 cm⁻¹ correspondiente a las vibraciones del grupo C-OH, y 900-650 cm⁻¹, bandas asociadas a modos C-H o O-H. Estas bandas características corresponden a los glucósidos en la celulosa presente en los biomateriales naturales [2,9,14]. Para los biomateriales pirolizados BAA, BAM y BAN están presentes compuestos pirolizados (C-C) y polisacáridos no pirolizados, observando picos atribuidos (i) O-H de alcoholes y fenoles, (ii) anillos aromáticos, (iii) C=O atribuidos a ácidos carboxílicos y ésteres, y (iv) CH presente en compuestos alifáticos y aromáticos [1,3].

En análisis por Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X se realizó por Espectroscopía IR, los biomateriales naturales BNA, BNM y BNN presentan grupos funcionales C=C (en lignina), C-C (en celulosa/hemicelulosa), C-O (en hidroxilos, fenoles o éteres), y C=O (en carbonilos, ésteres o carboxilos) [2]. Los biomateriales naturales BNA, BNM y BNN presentan picos de

difracción anchos, indicativos de una baja cristalinidad [1,2,14] y los biomateriales activados BAA, BAM y BAN revelan una estructura grafitica altamente desordenada con picos a 22.8 y 41.3° correspondiente a los planos (002) y (100), respectivamente, los cuales son indexados a una estructura grafitica JCPDS 00-056-0159 [1,3,14-15]. Los bioadsorbentes naturales BNA, BNM y BNN exhiben una matriz desordenada de esferas de polisacáridos, ver Figura 1(a). En contraste, los materiales activados (BAA, BAM y BAN) muestran una morfología porosa similar a un panal de abejas, resultado de la reacción del agente activante con el carbón (Figura 1(b)), lo que favorece la adsorción. El área superficial de los biomateriales naturales BNA, BNM y BNN es del 0.4-0.6 m²/g y bajo volumen de poro, lo que es característico de materiales sintetizados a bajas temperaturas (<100 °C) sin que ocurra carbonización [2].

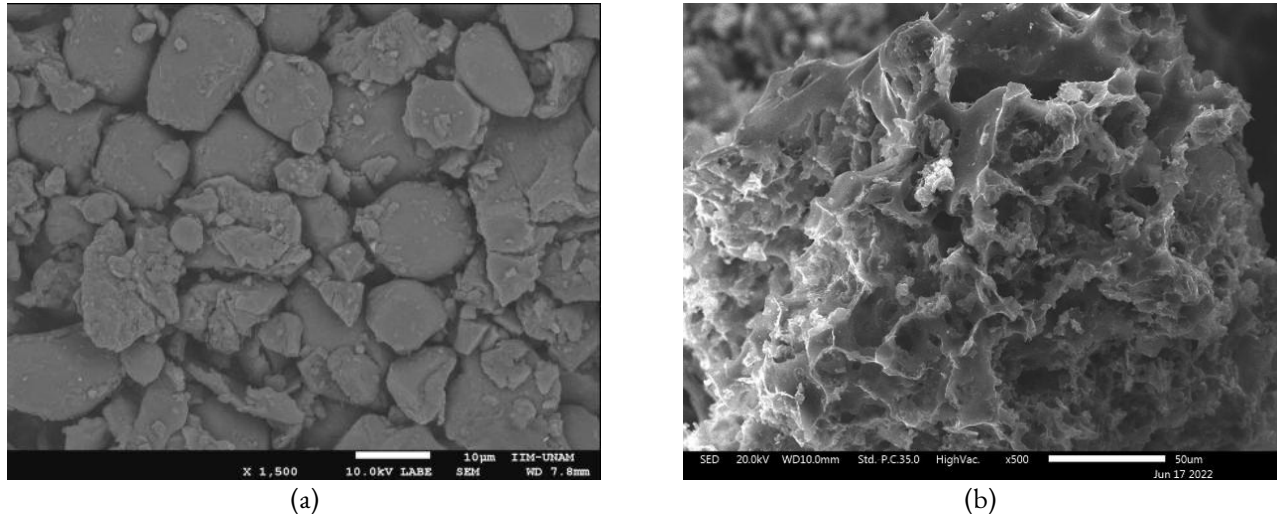


Figura 1. Morfología de los biomateriales natural BNA y activado BAA, a partir de residuos de aguacate [2,3].

Evaluación de la capacidad de adsorción

Colorantes RhB y AM

La evaluación de la capacidad de remoción de contaminantes en bioadsorbentes naturales, derivados principalmente de la piel y la semilla de aguacate y de mango, se realizó en un sistema de mezclado perfecto batch. Las condiciones óptimas de remoción se reportan en la literatura [2,9,18]. En la Figura 2 se muestra los perfiles de remoción de los colorantes, como se puede observar al incrementar la concentración de colorante RhB y AM, el porcentaje de remoción decrece, lo cual se atribuye a una mayor competencia por los sitios activos limitados [2,9,16,18]. En la Figura 3 se presenta el porcentaje de remoción del colorante RdB y AM empleado el bioadsorbente activado de aguacate BAA, como se puede observar la cantidad de remoción de RhB se incrementa cuando el biomaterial se activa, para las concentraciones 10 y 20 mg/L (ver Figura 2(a)). Esto se debe el área superficial del biomaterial se incrementa y con ello la cantidad de sitios. Mientras que, para el colorante AM los porcentajes de remoción son comparables para BNA y BAA.

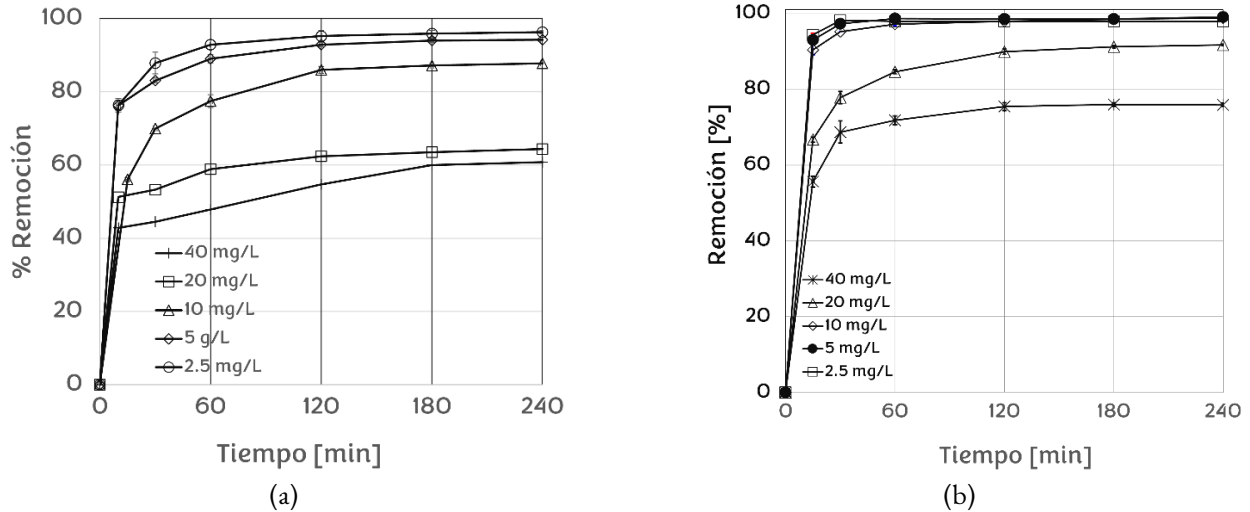


Figura 2. Remoción de los colorantes RhB (a) y AM (b) con biomateriales naturales de aguacate BNA, para una concentración de adsorbente de 1g/L y a pH de 7 [2,3].

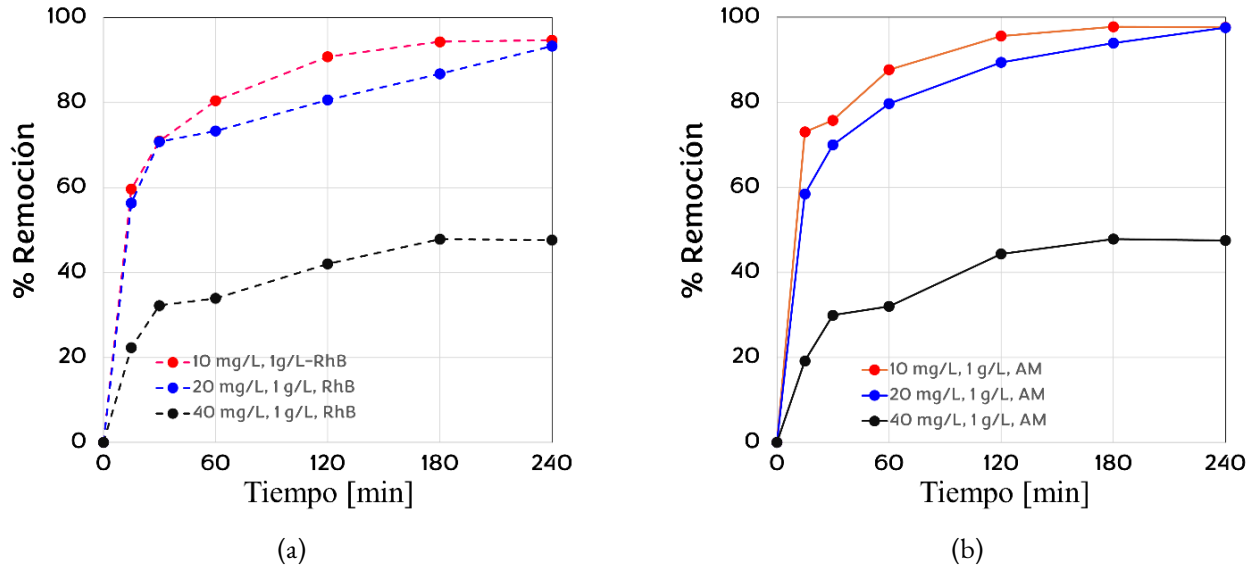


Figura 3. Remoción de los colorantes RhB (a) y AM (b) con biomateriales activados de aguacate BAA (usando como agente activante NaOH), para una concentración de adsorbente de 1g/L y a pH de 7.

Remoción de hidrocarburos

Para la remoción de hidrocarburos se empleó el bioadsorbente activado de naranja BAN, a una concentración de 0.5, 0.75 y 1 mg/L y a un pH de 5. En la Figura 4 se muestra la remoción de una mezcla de hidrocarburos, Xileno (20 mg/L) y Tolueno (20 mg/L). Como se puede observar, al incrementar la concentración de bioadsorbente decrece el porcentaje de remoción de hidrocarburos [14]. Este comportamiento se puede atribuir a que al incrementar la concentración de bioadsorbente, este se aglomera disminuyendo el área superficial del biomaterial y con esto la cantidad de sitios activos. Estos resultados son consistentes a lo reportado por los autores [19]. Evidenciado que los materiales residuales pueden ser una alternativa viable para la remediación de suelos y de agua contaminada por HC.

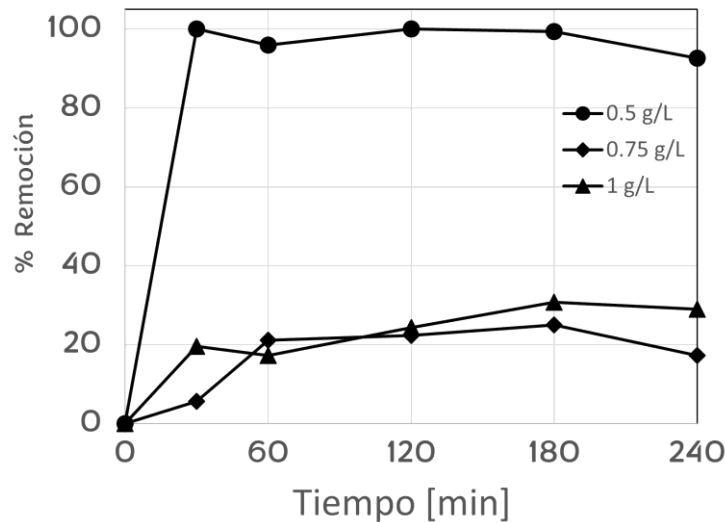


Figura 4. Remoción una mezcla de hidrocarburos (HC) empleando el biomaterial activado de naranja BAN (usando como agente activante H₃PO₄), para una concentración de adsorbente de 0.5, 0.75 y 1g/L y a pH de 5.

Remoción de plomo

Para la remoción de plomo se empleó el bioadsorbente activado de naranja BAN (activado con H₃PO₄ a 600°C por 3 h), a una concentración de 0.1, 0.25 y 0.5 mg/L y a un pH de 7 [15]. En la Figura 5 se muestra la remoción de una solución de plomo (70 mg/L). Como se puede observar, al incrementar la concentración de bioadsorbente aumenta el porcentaje de remoción de plomo. Este comportamiento se puede atribuir a que al incrementar la concentración de bioadsorbente se incrementa la cantidad de sitios activos disponibles para adsorber plomo [20].

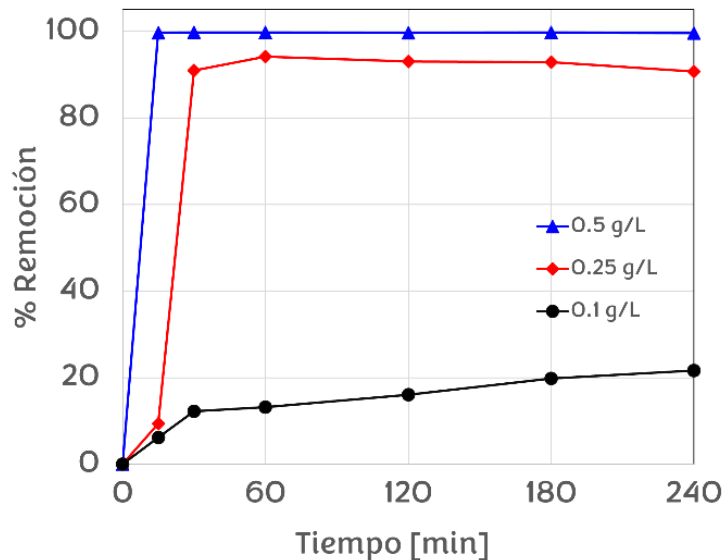


Figura 5. Remoción de plomo (Pb) empleando el biomaterial activado de naranja BAN (usando como agente activante H₃PO₄), para una concentración de adsorbente de 0.1, 0.25 y 0.5 g/L y a pH de 7.

Aplicación de bioadsorbentes para post-tratar agua tratada de una PTAR

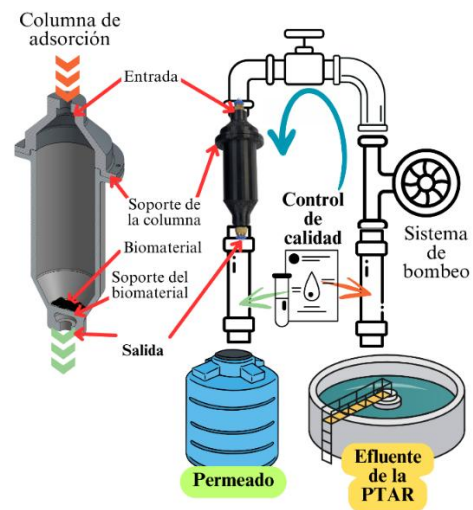


Figura 6(a). Vista de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de San Francisco Pichátaro. **Figura 6(b).** Esquema del procedimiento experimental de la aplicación de los bioadsorbentes activados.

Los biomateriales activados a partir de aguacate y de mango fueron aplicados para incrementar la calidad de agua tratada en la Planta de Tratamiento de Agua Residual en San Francisco Pichátaro, Michoacán, ver Figura 6(a). Para este propósito se empleó una columna de adsorción, a nivel laboratorio, con operación continua. En la columna (ver Figura 6(b)) se añadió 1 g de bioadsorbente (BAA-BAM) y se alimentó el agua tratada (efluente de la PTAR) en la parte superior de la columna. Por la parte inferior, se recolectó la muestra (permeado) y se analizó para evaluar los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), oxígeno disuelto (OD), dureza y nitratos.

Tabla 1. Resultados de Post-tratamiento del Agua Tratada

Muestra	Parámetro							
	pH	CE, mS/cm	STD, mg/L	COD, mg/L	TOC, mg/L	OD, mg/L	Dureza, mg/L	Nitratos, mg/L
Agua tratada (PTAR)	6.86	3.23	1630	799±37	571	0.8	850	15
Agua post-tratada (BAA)	8.5	3.22	1616	252±5	55	8.5	32	0.85
Agua post-tratada (BAM)	8.37	3.53	1670	143±12	24	3.7	64	8.3

Los resultados de la aplicación de los biomateriales para post-tratar el agua tratada de la PTAR se presentan en la Tabla 1. Como se puede observar, al aplicar bioadsorbentes activados BAA y BAM al efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Francisco Pichátaro, la calidad del agua mejoró significativamente [1,4]. Como resultados se obtuvo una remoción de DQO de 70-85 % y una remoción de materia orgánica (COT) de 90-95 %. Estos resultados confirman que el post-tratamiento

por bioadsorción con biomateriales activados de aguacate y mango son una solución eficaz y sostenible para aumentar la calidad del agua, haciendo que el agua tratada sea adecuada para la su reutilización en riego de cultivos o en uso doméstico [1,4].

Los resultados del uso de biomateriales (tecnología) para la remoción de contaminantes presentes en agua demuestra que es una tecnología viable y asequible para su implementación en Comunidades Rurales. La tecnología desarrollada se adhiere a los criterios de simplicidad, bajo costo y mantenimiento mínimo. Los puntos clave de la tecnología a destacar son:

- Minimización de residuos. La tecnología permite la valorización de residuos agroindustriales locales, lo que elimina los costos de materia prima, en contraste con los métodos convencionales.
- Ecotecnología local. En la síntesis de estos bioadsorbentes puede incorporar tecnologías apropiadas para la comunidad, tales como secadores solares artesanales y reactores pirolíticos alimentados con leña e instrumentados con sensores de bajo costo, lo que reduce la dependencia energética y los costos operativos.
- Tecnología. Para que la tecnología pueda implementarse se puede diseñar modularmente, lo que facilita su construcción e instalación con apoyo de la comunidad (herrereros y carpinteros locales).

La tecnología de biomateriales para el post-tratamiento de agua tratada se implementará en la PTAR de San Francisco Pichátaro con el proyecto PEE-2025-G-104 financiado por SECIHTI. La implementación se enmarca en el Plan de Justicia para los Pueblos Purépechas. Además, está fundamentado por un programa de educación ambiental para la capacitación y sensibilización ambiental.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una alternativa para el aprovechamiento y valorización de materiales residuales agroindustriales de aguacate, mango y naranja. Los biomateriales presentan grupos funcionales que permiten la adsorción de contaminantes orgánicos (colorantes, fármacos, y materia orgánica) y metales pesados, obteniéndose porcentajes de remoción, empleando altas concentraciones de contaminantes (por encima de los valores identificados en aguas residuales domésticas e industriales. Además, muestras excelentes propiedades superficiales y estabilidad térmica y química, lo que permite diversificar su aplicación en otras áreas. Los resultados muestran que los biomateriales son altamente eficaces, lo que indica que puede ser tecnología sostenible con potencial para su uso en comunidades rurales, para mejorar la calidad de agua tratada o para remover contaminantes presentes en mantos acuíferos.

Agradecimientos

A la SECIHTI por el Proyecto PEE-2025-G-104: "Desarrollo de materiales funcionales para el tratamiento de aguas residuales para un desarrollo justo y asequible de comunidades rurales Purépechas". Al proyecto UNAM DGAPA PAPIME PE105925 por las becas a los estudiantes que realizaron parte de la investigación: Mauricio García, Perla Nogales, Samantha Bochm. Sayra Orozco agradece a SECIHTI por la Beca de Posdoctorado de Consolidación M1 y M2 (I1200/320/2022 I1200/331/2023/MOD.ORD.12/2025). Los autores desean expresar su especial agradecimiento a las autoridades del Consejo Comunal, la comunidad indígena local de San Francisco Pichátaro, por su apoyo.

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación.

Referencias

- [1] A. Carrillo, S. Orozco, L. B. López Sosa, E. Montiel, M. Morales, R. Guerra and M. Rivero. Activated bioadsorbents from mangobyproducts and their application for post-treatment of treated wastewater. Preliminary studies. *Amb. Techné et Sci. Méx.* 13 (1) (2025) 33-47
- [2] S. Orozco, E. Montiel, J. Espino, R. Guerra, M. Chávez, J. Apolinar and M. Rivero. Effective RhB dye removal using sustainable

- natural bioadsorbents synthesized from avocado seed and skin. *Water, Air, & Soil Pollution* 235 (2024) (155).
- [3] S. Orozco, L. López-Sosa, E. Montiel, J. Espino, R. Guerra, J. Vargas, I. Alfonso, and M. Rivero. Green Practices in Wastewater Treatment: Upcycling Avocado Waste for Enhanced Water Sanitation. Case Study: WWTP in San Francisco Pichátaro, Michoacán. *Res. Eng.* 24 (2024) 103347
- [4] Secretaría de Economía (Data México, 2022. Disponible en: <https://nmv.sedeco.michoacan.gob.mx/economia/>
- [5] Dirección General de Difusión y Publicaciones, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2023 <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914>
- [6] Dirección General de Difusión y Publicaciones, Ley general de economía circular 2021 <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/5431> 2021.
- [7] S. Foorginezhad, M.M. Zerfat, M. Asadnia, G. Rezvannasab, Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture, *Mater. Chem. Phys.* 317 (2024) 4.
- [8] Guadalupe Morales, Sayra Orozco, Roberto Guerra, Michel Rivero. "Uso de residuos de aguacate para combatir la contaminación en el agua". XX Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación & 14 Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán. Octubre 8 - 10, 2025. Morelia, Michoacán, México
- [9] B. Chávez, S. Orozco, M. Rivero. Evaluación de parámetros cinéticos y termodinámicos durante el proceso de bioadsorción de colorantes. Memorias del V Coloquio Internacional en Ingeniería Química, "La Ingeniería Química en la Sociedad Actual". UMSNH. August 16 - 18, 2023
- [10] Samantha Bochm, Sayra Orozco, Esteban Montiel, Karen Murguía, Michel Rivero. "Biomateriales con especies Fe para reutilizar agua tratada". XX Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación & 14º Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán. Octubre 8 - 10, 2025. Morelia, Michoacán, México
- [11] Programa Nacional Hídrico 2020-2024, 2020.
- [12] Health World, Organization, Pan American health organization.
- [13] Cavazos-Arroyo, Judith, Pérez-Armendáriz, Beatriz, & Mauricio-Gutiérrez, Amparo. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agric. Soc. Des.*, 11(4), 539-550.
- [14] Perla Nogales, Sayra Orozco, Roberto Guerra González, Marco Martínez, Michel Rivero. "Desarrollo de un carbón activado de bajo costo a partir de residuos agroindustriales de naranja generados en Veracruz". (Oral) Congreso Nacional sobre Materiales de Frontera (CONAMAF) 2025. Septiembre 8-12, 2025, Morelia, Michoacán, México
- [15] Perla Nogales, Sayra Orozco, Esteban Montiel Palacios, Michel Rivero. "Remoción de plomo con carbón activado desarrollado a partir de residuos agroindustriales de aguacate". (Póster) Congreso Nacional sobre Materiales de Frontera (CONAMAF) 2025. Septiembre 8-12, 2025, Morelia, Michoacán, México
- [16] M. García-Rollán, E. Sanz-Santos, C. Bolver, J. Bedia. "Key adsorbents and influencing factors in the adsorption of micro- and nanoplastics: A review. *J. Envir. Man.*, 383, 125394, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125394>.
- [17] NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de Agua. Medición de Sólidos y sales disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas
- [18] S. Orozco, J. Espino, L. B. López Sosa and M. Rivero. Natural bio-adsorbent from avocado skin for cationic dye removal). *Amb. Techné Sci. Méx.* 12(1) (2024) 77-94.
- [19] Martínez et al. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales como Bioadsorbentes de Hidrocarburos. *Centro Azúcar* 51(2), 2024 e1066
- [20] Micha Soni, Dericks Praise Shukla, Nadjib Drouiche. Chapter 17 - Sustainable approaches to heavy metal removal from water, Editor(s): Arun Lal Srivastav, Ajmer Singh Grewal, Markandeya, Tien Duc Pham, In *Advances in Pollution Research, Role of Green Chemistry in Ecosystem Restoration to Achieve Environmental Sustainability*, 2024.