RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 06/08/2026 · *Aceptado:* 25/08/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/1fw1py49

BIOADSORBENTE DE MUSA PARADISIACA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE AL CARBÓN ACTIVADO PARA LA REMOCIÓN DE CIANOBACTERIAS Y CIANOTOXINAS EN AGUA DEL RÍO DAULE, ECUADOR

MUSA PARADISIACA BIOADSORBENT AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO ACTIVATED CARBON FOR THE REMOVAL OF CYANOBACTERIA AND CYANOTOXINS FROM DAULE RIVER WATER, ECUADOR

[1,] Villa Sanchéz Fabiola*	fabiola.villas@ug.edu.ec
[1] Coloma Coloma Tony	tony.colomac@ug.edu.ec
[1] Briones Rosado Aleska	aleska.brionesr@ug.edu.ec
[1] Caiza Alay Maria	maria.caizaa@ug.edu.ec

[1] Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, Guayas, Ecuador.

E-mail: fabiola.villas@ug.edu.ec *

RESUMEN

La eutrofización en ecosistemas de agua dulce tropicales ha intensificado la proliferación de cianobacterias, generando riesgos no solamente para la salud pública sino para el equilibrio ecológico, por ello, esta investigación tuvo como objetivo comparar el desempeño del carbón activado convencional frente a un bioadsorbente elaborado con cáscara de plátano (Musa paradisíaca) en agua del río Daule. Se empleó un diseño experimental cuantitativo, evaluando dosis de 0,5; 1 y 2 gramos por cada 100 ml de muestra. El bioadsorbente se sintetizó mediante activación con H3PO4 al 50% (relación 2:1), carbonización a 500 °C durante 1 hora y lavado hasta alcanzar un pH neutro. Las muestras se analizaron con siembra en BG 11 y fotómetro HACH DR 900; los resultados evidenciaron que el bioadsorbente removió el 97,45% de cianobacterias y 77,1% de nitratos, superando al carbón convencional con 96,30% y 35,40%, respectivamente (ANOVA F=1800,755; p < 0,001). Se concluye que se cumplió el objetivo planteado, demostrando la superioridad del bioadsorbente a partir de cáscara de plátano.

Palabras clave: *bioadsorbente, cáscara de plátano, carbón activado, cianobacterias, remoción, río Daule.*

ABSTRACT

Eutrophication in tropical freshwater ecosystems has intensified cyanobacterial blooms, generating risks not only for public health but also for ecological balance. Therefore, this research aimed to compare the performance of conventional activated carbon against a biosorbent made from banana peel (Musa paradisiaca) in water from the Daule River. A quantitative experimental design was employed, evaluating doses of 0.5, 1, and 2 grams per 100 ml of sample. The biosorbent was synthesized through activation with 50 % H_3PO_4 (2:1 ratio), carbonization at 500 °C for 1 hour, and washing until reaching neutral pH. Samples were analyzed using BG-11 plating and a HACH DR 900 photometer; results showed that the biosorbent removed 97.45 % of cyanobacteria and 77.1 % of nitrates, surpassing conventional carbon with 96.30 % and 35.40 %, respectively (ANOVA F=1800.755; $p < 0.001$). It is concluded that the proposed objective was achieved, demonstrating the superiority of the banana peel-derived biosorbent.

Keywords: *biosorbent, banana peel, activated carbon, cyanobacteria, removal, Daule River*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la eutrofización de cuerpos de agua dulce ha emergido como uno de los principales desafíos para la preservación de los cuerpos hídricos superficiales. Este proceso consiste en el enriquecimiento excesivo de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, provenientes de actividades agrícolas, descargas urbanas y efluentes industriales, lo que genera condiciones propicias para el crecimiento descontrolado de microorganismos fotosintéticos, entre los que destacan las cianobacterias [1].

Las cianobacterias son microorganismos procariotas fotosintéticos ampliamente distribuidos en ecosistemas acuáticos cuya relevancia radica en su capacidad para producir metabolitos secundarios conocidos como cianotoxinas [2], entre las cianotoxinas más estudiadas se encuentran las microcistinas, las cuales han sido detectadas en cuerpos de agua de diversas regiones del mundo, asociándolas con casos de intoxicación [3]. Estas sustancias representan un riesgo significativo para la salud humana y animal debido a su potencial hepatotóxico, neurotóxico y dermatotóxico [4].

La región costera de Ecuador particularmente la provincia de Guayas presenta condiciones climáticas favorables para el desarrollo de floraciones de cianobacterias, puesto que cuenta con un clima tropical caracterizado por temperaturas elevadas, radiación solar y periodos de sequía e inundaciones combinados con la descarga de nutrientes provenientes de la agricultura intensiva [5]. El río Daule constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Guayaquil y su área metropolitana por lo que la presencia de cianobacterias en sus aguas representa un riesgo directo para la salud de todos los habitantes [6].

Las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas incluyen diversos procesos fiscoquímicos y biológicos entre estos el uso de carbón activado, ya que presenta una elevada capacidad de retención de compuestos orgánicos y su versatilidad operativa, sin embargo el elevado costo de este material y su dependencia de recursos no renovables han motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles [7]. En este contexto los residuos agroindustriales han despertado un creciente interés como precursores para la obtención de materiales adsorbentes de bajo costo y menor impacto ambiental entre estos residuos la cáscara de plátano representa una fuente abundante de biomasa lignocelulósica en Ecuador debido a la alta producción y exportación de este fruto, además de la presencia de grupos funcionales como hidroxilos, carbóxidos y carbonilos en la superficie de la biomasa lo cual facilita la interacción con diversos contaminantes mediante mecanismos de adsorción física y química [8].

Investigaciones previas han demostrado la eficiencia de adsorción derivados de residuos vegetales en la remoción de metales pesados colorantes y compuestos orgánicos de soluciones acuosas [9], específicamente se ha reportado que el carbón activado obtenido a partir de cáscara de plátano presenta eficiencias de remoción superiores al 90% para diversos contaminantes bajo condiciones optimizadas.

Sin embargo existe una limitada evidencia científica respecto a la aplicación de estos materiales para la remoción de cianobacterias y sus toxinas en cuerpos de agua superficiales la presente investigación se fundamenta en la hipótesis de que el adsorbente elaborado a partir de cáscara de plátano (Musa paradisiaca) presenta una capacidad de remoción de cianobacterias superior o comparable a la del carbón activado convencional, esta hipótesis se sustenta en las propiedades fisico químicas de la biomasa lignocelulósica y en los antecedentes reportados en la literatura científica, planteando de esta forma como objetivo general de este estudio comparar el comportamiento del carbón activado convencional y del bioadsorbente de cáscara de plátano frente a la presencia de cianobacterias en muestras de agua del río Daule.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño Experimental

La presente investigación se enmarcó en un diseño experimental de tipo cuasiexperimental con enfoque cuantitativo, donde la variable independiente correspondió al tipo de adsorbente aplicado (carbón activado convencional y bioadsorbente de cáscara de plátano), mientras que la variable dependiente fue la presencia de cianobacterias viables, determinada mediante conteo de unidades formadoras de colonias por mililitro. Para ello, se evaluaron tres niveles de dosis (0,5; 1,0 y 2,0 gramos por cada 100 mililitros de agua) y cada tratamiento se realizó por triplicado con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados. El estudio se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil durante el período comprendido entre abril y julio de 2026.

Obtención y preparación de la materia prima

La materia prima para la obtención del bioadsorbente consistió en cáscaras de plátano de la variedad dominico Musa paradisiaca en estado verde, las cuales fueron recolectadas en un establecimiento de venta de alimentos ubicado al suroeste de la ciudad de Guayaquil. En total se recolectaron 14,235 kilogramos de cáscaras, que fueron sometidas a una inspección visual para descartar aquellas que presentaban signos de deterioro, maduración excesiva o daños mecánicos, obteniendo finalmente 12,350 kilogramos de materia prima en condiciones óptimas.

Las cáscaras seleccionadas fueron lavadas con agua destilada para eliminar residuos de tierra e impurezas superficiales, y posteriormente se cortaron en trozos de aproximadamente 2 a 3 centímetros para facilitar las etapas posteriores del proceso. El material cortado fue sometido a un pre-secado natural mediante exposición directa a la luz solar durante cuatro días, lo que permitió reducir el contenido de humedad inicial y alcanzar un peso de 3,485 kilogramos con una humedad del 23 por ciento. Luego, se realizó un secado en estufa de laboratorio MEMMERT modelo UM 500 a 105 grados Celsius durante 10 horas para reducir la humedad al 8 por ciento, obteniendo así 1,364 kilogramos de material seco.

El material deshidratado fue sometido a molienda en un molino automático y posteriormente tamizado utilizando un juego de tamices acoplados a una máquina vibradora; de este proceso se recuperaron 0,706 kilogramos de material con un tamaño de partícula de 0,300 milímetros, correspondiente a la malla número 50. Esta fracción fue seleccionada para el proceso de activación química, ya que los estudios previos indican que tamaños de partícula en este rango favorecen la eficiencia de adsorción al proporcionar una mayor superficie de contacto.

Activación Química y carbonización

El proceso de activación química se realizó utilizando ácido fosfórico al 50 por ciento como agente activador, en una relación de 2 mililitros de ácido por cada gramo de biomasa, relación que fue seleccionada después de evaluar las proporciones 1:1 y 2:1, y al observar que esta última producía un material con mejor coloración y textura. Una vez preparada la mezcla, esta fue agitada durante 30 minutos y posteriormente se dejó en reposo durante 24 horas para asegurar una impregnación adecuada del ácido en la estructura de la biomasa.

El material impregnado fue sometido a deshidratación en estufa a 110 grados Celsius durante 24 horas, para luego proceder con la carbonización, la cual se llevó a cabo en una mufla THERMOLYNE modelo FBI 400 a una temperatura de 500 grados Celsius durante una hora; cabe señalar que esta temperatura fue seleccionada después de descartar los 550 grados Celsius, ya que esta última producía un material de consistencia asfáltica con propiedades adsorbentes deficientes. Finalmente, el material carbonizado fue lavado con agua destilada a 80 grados Celsius en repetidas ocasiones hasta alcanzar un pH neutro, y una vez logrado esto, el producto fue filtrado y deshidratado en estufa a 105 grados Celsius durante una hora, para después ser almacenado en recipientes herméticos con el fin de garantizar su conservación.

Caracterización del bioadsorbente

El bioadsorbente obtenido fue caracterizado en el Laboratorio de Análisis Químico Instrumental LAQUINS de la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, donde se determinó el contenido de humedad siguiendo el método ASTM D 3173, el contenido de cenizas según ASTM D 1762 y la densidad aparente mediante un método interno del laboratorio; estos parámetros permiten evaluar la calidad del material y su potencial como adsorbente en aplicaciones de tratamiento de agua.

Recolección y caracterización de muestras de agua

Las muestras de agua fueron recolectadas en el río Daule específicamente en el sector El Señor de los Milagros cercano a la parroquia Ximena en el cantón Daule en las coordenadas geográficas 1.867178 grados de longitud sur y 79.987566 grados de longitud oeste. Esta zona fue seleccionada por ser representativa de las condiciones hidrológicas del río y por presentar actividades agrícolas intensivas que contribuyen al aporte de nutrientes, el muestreo se realizó siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la conservación de las muestras.

Antes y después de los tratamientos se hizo la caracterización de parámetros fisicoquímicos como nitratos, nitritos, fosfatos y pH con un fotómetro portátil (HACH DR 900), siguiendo los métodos estandarizados del fabricante, cada análisis se realizó por triplicado para asegurar la precisión de los resultados.

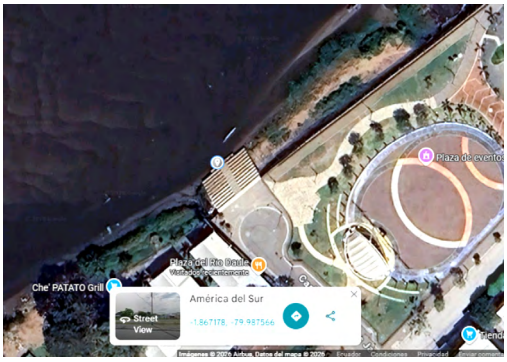


Figura 1. *Ubicación geográfica de toma de muestras de agua en el río Daule (Parroquia Ximena).*

Ensayos de adsorción

Los ensayos de adsorción se llevaron a cabo mediante un proceso por lotes a escala de laboratorio, se utilizaron vasos de precipitación de 250 ml, en los cuales se colocaron 100 ml de agua del río Daule sin tratar. Se ensayaron con tres dosis diferentes 0,5; 1,0 y 2,0 gramos, la agitación se mantuvo durante un tiempo de contacto de una hora para asegurar la homogeneización de la mezcla y el contacto adecuado entre el adsorbente y el agua. El tiempo fue seleccionado basándose en estudios previos que indican que la adsorción alcanza el equilibrio en periodos de 30 a 60 minutos.

Transcurrido el período de contacto cada muestra fue filtrada y almacenada para su posterior análisis fisicoquímico y microbiológico, rotuladas y en condiciones ambientales controladas a una temperatura ambiente de 25 °C.

Análisis microbiológico

Para la cuantificación de cianobacterias se preparó el medio de cultivo BG-11 con la adición de agar al 1.7% siguiendo las especificaciones del fabricante, ampliamente utilizado, ya que proporciona los nutrientes necesarios para su crecimiento, las muestras fueron sometidas a diluciones seriadas en medio BG-11 líquido, la siembra se realizó por diseminación en superficie en placas Petri, con el medio sólido inoculando 100 microlitros de cada dilución.

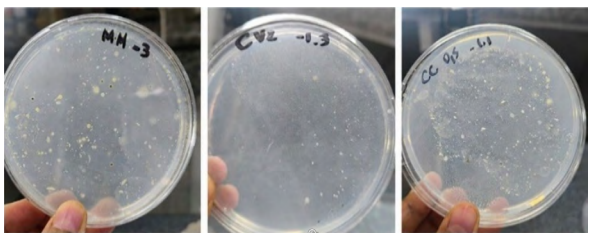


Figura 2. *Unidades formadoras de colonias visibles despues de cada tratamiento(MM: muestra sin tratar; CV: bioadsorbente de cáscara de platano; CC: carbón convencional)*

La incubación se llevó a cabo a temperatura ambiente bajo un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad durante 7 días, tiempo suficiente para que las cianobacterias formen colonias visibles que puedan ser contadas.

Cada conteo se realizó por triplicado, seleccionando aquellas placas que presentaran entre 25 y 250 colonias siguiendo las recomendaciones de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos para el conteo microbiológico.

3. RESULTADOS

Caracterización del bioadsorbente

La **Tabla 1** presenta los resultados de la caracterización del bioadsorbente como el contenido de humedad, cenizas, densidad aparente y número de yodo, resultados que demuestran que el bioadsorbente se encuentra dentro de las normas estipuladas.

Tabla 1. *Caracterización del bioadsorbente de Musa paradisiaca.*

Parámetro	Unidad	Resultado	Método
Humedad	%	1.98	ASTM D 3173
Cenizas	%	4.01	ASTM D 1762
Densidad aparente	g/mL	0.2462	Método interno
Número de yodo	-	600.52	ASTM D4607

Nota: *Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Análisis Químico Instrumental LAQUINS de la ESPOL.*

Eficiencia de remoción de nutrientes

La Tabla 2 presenta los resultados de remoción de nutrientes asociados a la eutrofización de estos microorganismos, nutrientes que fueron medidos antes y después de los tratamientos, mostrando una remoción de 77,1% de nitratos con el bioadsorbente elaborado (CV2) a la dos de 2 gramos superior a los obtenidos con el carbón convencional, mismos que se compararos con los obtenidos de la muestra sin tratar (MM).

Tabla 2. *Comparación de la eficiencia de remoción entre carbón convencional (CC) y bioadsorbente de cáscara de plátano (CV).*

		Parámetro (mg/L)				
		Nitratos	**Remoción NO_3 (%)**	**Nitritos**	**Remoción NO_2 (%)**	**Fosfatos**
MM		9.6	-	0.025	-	2
CC	0.5	3.9	59.4%	0.012	52%	5.2
	1	5.6	41.7%	0.012	52%	6.4
	2	6.2	35.4%	0.012	52%	7

	0.5	3	68.8%	0.012	52%	5
CV	1	2.5	74.0%	0.008	68%	5.4
	2	2.2	77.1%	0.008	68%	5.8

Remoción de cianobacterias

Para esta sección se realizó el conteo de UFC/ml por triplicado, el conteo reflejo los siguientes resultados **Tabla 3**, dando un porcentaje de remoción de 97,75% de cianobacterias con el bioadsorbente elaborado ligeramente superior a 96.30% obtenido con el carbón convencional.

Para este conteo se implementó la siguiente ecuación

$$\frac{\text{numero de colonias}}{\text{(Volumen sembrado en ml * factor de disolucion)}}$$

Tabla 3. *Recuento de cianobacterias (UFC/ml) en los diferentes tratamientos..*

	Control	CC 0.5	CC 1	CC 2	CV 0.5	CV 1	CV 2
R1(UFC/mL)	23600	1500	1200	950	1120	950	650
R2 (UFC/mL)	24800	1440	1220	900	1100	840	640
R3 (UFC/mL)	24900	1450	1180	860	990	960	580
Promedio (UFC/mL)	24433.33	1463.33	1200	903.33	1070	916.67	623.33
Remoción (%)	-	94,01	95,09	96,30	95,62	96,25	97,45

En la Tabla 4 se presentan los valores de UFC/mL transformados a Log10 (UFC); con ello se buscó cumplir los supuestos del análisis de varianza (ANOVA), estabilizando la varianza y normalizando la distribución.

Tabla 4. *Valores transformados a Log10 (UFC) de cada tratamiento, respectivamente*

	Control	CC 0.5	CC 1	CC 2	CV 0.5	CV 1	CV 2
R1	4.373	3.176	3.079	2.978	3.049	2.978	2.813
R2	4.394	3.158	3.086	2.954	3.041	2.924	2.806
R3	4.396	3.161	3.072	2.934	2.996	2.982	2.763

Análisis de varianza (ANOVA)

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor a los datos transformados, para así determinar si existían diferencias significativas entre los grupos evaluados (Control, CC y CV)

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) demuestran que, al ser el valor de F significativamente mayor que el valor crítico, existe una diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados.

El p-valor (2.18292E-19) obtenido es un valor mucho menor que el nivel de significancia establecido confirmando que al menos uno de los tratamientos presenta una reducción significativa de cianobacterias en comparación con los demás, valores reflejados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. *Valores transformados a Log10 (UFC) de cada tratamiento, respectivamente*

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	5.2122772	6	0.8687129	1800.755
Dentro de las muestras	0.0067538	14	0.0004824	
Total	5.2190310	20	0.2609515	

Valor critico	2.847725996
p-valor	2.18292E-19

Para identificar qué tratamientos presentan diferencias significativas entre sí, se realizó la prueba múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$), mediante esta prueba, se determinó la diferencia significativa entre cada grupo.

La prueba de Tukey (Tabla 6) mostró que CV 2 (letra E) fue significativamente diferente a todos los demás tratamientos.

Tabla 6. *Agrupación de tratamientos según Tukey.*

Tratamiento	Dosis (g/100 m/L)	Log_{10} UFC	DE	Grupo Tukey
MM	-	4,388	0,013	**A**
CC	0.5	3,165	0,009	**B**
	1	3,079	0,007	**C**
	2	2,956	0,022	**D**
CV	0.5	3,029	0,028	**D**
	1	2,961	0,031	**D**
	2	2,795	0,027	**E**

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que el bioadsorbente de cáscara de plátano presenta una eficiencia de remoción de cianobacterias superior a la del carbón activado convencional, alcanzando un 97.45 % frente al 96.30% del carbón convencional a la misma dosis de 2.0 gramos por 100 mililitros. Esta diferencia, aunque parece modesta en términos porcentuales, es estadísticamente significativa, como lo confirma el análisis de varianza ($F = 1800.755$; $p < 0.001$) y la prueba de Tukey, que posicionó al CV 2 en un grupo estadísticamente diferente al de CC 2. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han reportado eficiencias superiores al 90 % en la remoción de diversos contaminantes utilizando bioadsorbentes derivados de cáscara de banana [10].

La mayor eficiencia observada con el bioadsorbente puede explicarse por sus características fisicoquímicas particulares que difieren de las del carbón activado convencional. La composición lignocelulósica de la cáscara de plátano, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, confiere al material una estructura porosa con una elevada superficie específica y una amplia distribución de grupos funcionales oxigenados [11]. Estos grupos funcionales, entre los que destacan los hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH) y carbonilos (C=O), favorecen la interacción electrostática y el intercambio iónico con las superficies celulares de las cianobacterias, lo que potencia el proceso de adsorción [12].

La remoción de nitratos alcanzada por el bioadsorbente (77.1 %) supera ampliamente a la del carbón activado convencional (35.4 %), lo que constituye un hallazgo de particular relevancia. Los nitratos, como nutrientes esenciales para el crecimiento de cianobacterias, son responsables directos de la eutrofización y la proliferación de floraciones algales. La capacidad del bioadsorbente para remover nitratos sugiere que su aplicación no solo elimina las cianobacterias existentes, sino que también reduce la disponibilidad de nutrientes necesarios para su crecimiento futuro, generando un efecto sinérgico en el control de la proliferación de estos microorganismos. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de sitios activos cargados positivamente en la superficie del bioadsorbente, que favorecen la retención de aniones nitrato a través de interacciones electrostáticas [13].

La diferencia en el comportamiento del pH entre ambos adsorbentes merece una atención especial. El carbón activado convencional generó un ambiente alcalino con valores superiores a 8, mientras que el bioadsorbente acidificó ligeramente el agua con valores entre 6.9 y 7.7. Este fenómeno puede atribuirse a la naturaleza química de la superficie de cada material. Durante el proceso de activación con ácido fosfórico, la superficie del bioadsorbente adquiere grupos fosfato y grupos ácidos carboxílicos que pueden liberar protones al medio acuoso, reduciendo el pH [14]. Por el contrario, el carbón activado convencional, especialmente aquel con alta temperatura de activación, puede presentar una superficie básica debido a la presencia de grupos pirónicos y crómenos que capturan protones del medio [15].

Es importante señalar que ambos adsorbentes mostraron un incremento en la concentración de fosfatos después del tratamiento. Este fenómeno, aunque indeseable, puede explicarse por la liberación de fósforo desde la superficie de los materiales durante el proceso de adsorción, posiblemente debido a la desorción de fosfatos que se encontraban retenidos en la estructura del material o a la liberación de compuestos fosforados residuales del proceso de activación [14].

La comparación de los resultados con estudios previos permite contextualizar los hallazgos de la presente investigación. Al-sareji et al. [16] reportaron una eficiencia de remoción de contaminantes farmacéuticos del 92 por ciento utilizando carbón activado de cáscara de plátano, mientras que Bakar et al. [11] alcanzaron eficiencias superiores al 95 % en la remoción de colorantes. Estos valores son comparables al 97.45 % obtenido en la presente investigación para la remoción de cianobacterias, lo que sugiere que el bioadsorbente de cáscara de plátano es un material versátil con aplicabilidad en la remoción de una amplia gama de contaminantes. Sin embargo, es importante reconocer que la mayoría de estos estudios se han realizado en condiciones de laboratorio con soluciones sintéticas, mientras que la presente investigación utilizó agua real del río Daule, lo que añade complejidad al sistema debido a la presencia de materia orgánica natural, sólidos suspendidos y otros contaminantes que pueden competir por los sitios de adsorción [17].

En términos de sostenibilidad, la valorización de este residuo para la producción de materiales adsorbentes no solo reduce el costo del tratamiento de agua, sino que también contribuye a la gestión sostenible de los residuos sólidos y a la economía circular. Además, el proceso de activación química con ácido fosfórico, aunque requiere un manejo cuidadoso, es menos energético que la activación física con vapor o CO_2, lo que reduce la huella de carbono del proceso [18].

5. CONCLUSIONES

El estudio comparativo permitió demostrar que el bioadsorbente de cáscara de plátano (Musa paradisiaca) presenta un comportamiento superior al del carbón activado convencional en la remoción de cianobacterias presentes en el agua del río Daule.

El bioadsorbente alcanzó una eficiencia de remoción de cianobacterias del 97,45% a la dosis de 2,0 g/100 ml, superando al carbón activado convencional que registró 96,30% en las mismas condiciones. Adicionalmente, demostró una capacidad superior para la remoción de nitratos (77,1% frente al 35,4% del carbón convencional), lo que evidencia su potencial para mitigar los procesos de eutrofización asociados a la proliferación de estos microorganismos.

La caracterización de síntesis implementada, que incluyó activación química con ácido fosfórico al 50% en relación 2:1 y carbonización a 500 °C, permitió obtener un bioadsorbente con propiedades fisicoquímicas adecuadas (humedad 1,98% , cenizas 4,01%, densidad aparente 0,2462 g/ml), confirmando que la cáscara de plátano constituye un precursor viable para la producción de materiales adsorbentes debido a su composición lignocelulósica y grupos funcionales.

El análisis mediante ANOVA ($F=1800.755$; $p<0.001$) y la prueba de Tukey confirmaron que las diferencias observadas son estadísticamente significativas, permitiendo aceptar la hipótesis planteada.

Desde una perspectiva ambiental y tecnológica, estos hallazgos demuestran que es posible valorizar un residuo agroindustrial abundante en Ecuador, transformándolo en un material de alto valor agregado para el tratamiento de aguas superficiales.Esta aproximación promueve prácticas orientadas a la economía circular y ofrece una alternativa de bajo costo frente a los adsorbentes comerciales.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Guayaquil y a la Facultad de Ingeniería Química por facilitar los espacios, laboratorios y equipos para el desarrollo de la presente investigación, así como al laboratorio LAQUINS de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses que pudieran haber influido en la realización o presentación de este trabajo.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Cao A, Vilariño N, de Castro Alves L, Piñeiro Y, Rivas J, Botana AM, et al. Improving the effectiveness of safe cyanotoxin removal from drinking water using magnetic iron oxide nanoparticle-loaded carbon composites. Journal of Water Process Engineering 2025;75:107962. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107962.

[2] Gupta K, Soni N, Nema RK, Sahu N, Srivastava RK, Ratre P, et al. Microcystin-LR in drinking water: An emerging role of mitochondrial-induced epigenetic modifications and possible mitigation strategies. Toxicol Rep 2024;13:101745. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101745.

[3] Chorus I, Welker M. Toxic Cyanobacteria in Water. Toxic Cyanobacteria in Water 2021. https://doi.org/10.1201/9781003081449.

[4] Zhang W, Liu J, Xiao Y, Zhang Y, Yu Y, Zheng Z, et al. The Impact of Cyanobacteria Blooms on the Aquatic Environment and Human Health. Toxins (Basel) 2022;14:658. https://doi.org/10.3390/toxins14100658.

[5] Coloma Gavilanes JF, Labanda Lucero RA. Herramientas moleculares para la detección de cianobacterias potencialmente tóxicas en ecosistemas acuáticos del Río Daule. ESPOL; 2023.

[6] Hernán F, Castillo U, Luís J, Molina E, Lilia R, Merchán P, et al. Calidad de agua del río Daule en la periferia de la cabecera cantonal, noviembre - diciembre 2023. Revista Científica ARISTAS 2024;6:70–84. https://doi.org/10.5281/ZENODO.16340418.

[7] Ramutshatsha-Makhwedzha D, Mbaya R, Mavhungu ML. Application of Activated Carbon Banana Peel Coated with Al2O3-Chitosan for the Adsorptive Removal of Lead and Cadmium from Wastewater. Materials 2022, Vol 15, Page 860 2022;15:860. https://doi.org/10.3390/MA15030860.

[8] Bermeo SMB, Sánchez EYO, Calero LGV. Estudio de la bioadsorción de metales pesados (Pb y Cu) en las aguas del río Puyango, utilizando cáscara de naranja y plátano manzano. Ingeniería Química y Desarrollo -Universidad de Guayaquil 2022;4:11–20. https://doi.org/10.53591/iqd.v4i01.1475.

[9] Villa Sánchez FE. Evaluación de la capacidad adsorbente de la cáscara de naranja (Citrus sinensis) y coco (Cocos nucífera) para la remoción de metales pesados (Cr, Pb). UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO, 2022.

[10] Das K, Sukul U, Chen JS, Sharma RK, Banerjee P, Dey G, et al. Transformative and sustainable insights of agricultural waste-based adsorbents for water defluoridation: Biosorption dynamics, economic viability, and spent adsorbent management. Heliyon 2024;10:e29747. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E29747.

[11] Bakar NA, Othman N, Yunus ZM, Altowayti WAH, Al-Gheethi A, Asharuddin SM, et al. Nipah (Musa Acuminata Balbisiana) banana peel as a lignocellulosic precursor for activated carbon: characterization study after carbonization process with phosphoric acid impregnated activated carbon. Biomass Conversion and Biorefinery 2021 13:12 2021;13:11085–98. https://doi.org/10.1007/S13399-021-01937-5.

[12] Dar A, Rehman R, Hafeez M, ul-Ain N, Yaseen G, Anwar J, et al. Sequestration of cyanide ions from aqueous medium by physio-chemically fabricated biochar of peels of banana and grape fruit in ecofriendly way. Int J Phytoremediation 2024;26:1701–15. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2349721.

[13] Abuelnoor N, AlHajaj A, Khaleel M, Vega LF, Abu-Zahra MRM. Activated carbons from biomass-based sources for CO2 capture applications. Chemosphere 2021;282:131111. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131111.

[14] Neme I, Gonfa G, Masi C. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. Heliyon 2022;8:e11940. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11940.

[15] Younes K, Abdallah M, Hanna EG. The application of principal components analysis for the comparison of chemical and physical properties among activated carbon models. Mater Lett 2022;325:132864. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.132864.

[16] Al-sareji OJ, Grmasha RA, Meiczinger M, Al-Juboori RA, Somogyi V, Hashim KS. A Sustainable Banana Peel Activated Carbon for Removing Pharmaceutical Pollutants from Different Waters: Production, Characterization, and Application †. Materials 2024;17:1032. https://doi.org/10.3390/MA17051032/S1.

[17] Huang Y, Lenhart JJ. The dependence in microcystin removal with powdered activated carbon on variant properties, carbon properties, and dissolved organic matter. Chemosphere 2024;351:141205. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141205.

[18] Lewoyehu M. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. J Anal Appl Pyrolysis 2021;159:105279. https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105279.