

ORIGINAL

Application of Activated Carbon from Cabuya Negra (*Agave americana L.*) for Diuron Adsorption in aqueous solutions: a sustainable alternative for wastewater treatment

Aplicación de carbón activado de Cabuya Negra (*Agave americana L.*) para la absorción de Diuron en soluciones acuosas: una alternativa sostenible para el tratamiento de efluentes

Linda M Flores Fiallos¹  , Sofia Carolina Godoy Ponce¹  , Daniel Alejandro Heredia Jara¹  , Nora Tahiri Mejía Cabezas²  

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Ciencias. Riobamba 060106, Ecuador.

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Ciencias Pecuarias. Riobamba 060106, Ecuador.

Citar como: Flores Linda LM, Godoy Ponce SC, Heredia Jara DA, Mejía Cabezas NT. Application of Activated Carbon from Cabuya Negra (*Agave americana L.*) for Diuron Adsorption in Aqueous Solutions: A Sustainable Alternative for Wastewater Treatment. Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias. 2025; 4:1475. <https://doi.org/10.56294/sctconf20251475>

Enviado: 28-07-2024

Revisado: 09-12-2024

Aceptado: 24-02-2025

Publicado: 25-02-2025

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González 

Autor para la correspondencia: Linda M Flores Fiallos 

ABSTRACT

The Cabuya Negra (*Agave americana L.*) is widely distributed in South America and is considered a perennial plant due to its adaptability to dry and arid climates. It grows and develops extensively, mainly being used to delineate land boundaries. This study aimed to repurpose this biomass through the production of activated carbon as an adsorbent material for the removal of Diuron from aqueous solutions. The activated carbon was found to contain functional groups such as methyl, carbonyl, and hydroxyl, and the presence of phosphorus bonds was also observed, confirming the effectiveness of the chemical activation process using phosphoric acid. EDS analysis revealed that the activated carbon was primarily composed of carbon (85,68 %), with a low ash content (11,8 %), indicating that a significant portion of the organic material was consumed during the pyrolysis process. Two Diuron solutions (100 mL and 50 mL) were prepared, to which 0,25 g and 0,5 g of activated carbon were added. The adsorbent demonstrated high efficiency in Diuron removal, with the best treatment achieving 63,39 % removal using 0,25 g of activated carbon with 100 mL of Diuron solution. These findings demonstrate that the activated carbon obtained is a viable alternative for the removal of this herbicide from aqueous solutions.

Keywords: Fiber; Carbon; Chemical Activation; Adsorption; Diuron.

RESUMEN

La Cabuya Negra (*Agave americana L.*) está ampliamente distribuida en América del Sur, considerada como una planta perenne ya que se adapta fácilmente a climas secos y áridos, crece y se desarrolla a gran escala siendo usada principalmente para delimitar extensiones de terrenos. Este estudio buscó darle un nuevo propósito a esta biomasa a través de la producción de carbón activado como material adsorbente en la remoción de Diuron en soluciones acuosas. Se observó que el carbón contiene grupos funcionales como metilo, carbonilo e hidroxilo, también se pudo observar la presencia de enlaces con fósforo demostrando así que la activación química utilizando este ácido fue correcta. El análisis por EDS demostró que gran porcentaje del carbón activado está compuesto principalmente por carbono (85,68 %), también se observó que el contenido de ceniza fue bajo (11,8 %) evidenciando que gran parte del material orgánico se consumió durante el proceso de pirólisis. Se prepararon dos soluciones de 100 mL y 50 mL de Diuron al cual se adicionó 0,25 y 0,5 gramos

de carbón activado demostrando que el adsorbente mostró una fuerte eficiencia de remoción de Diuron, obteniendo la remoción de 63,39 % siendo el mejor tratamiento 0,25g de carbón activado con 100 mL de Diuron. Demostrando que el carbón activado obtenido es una alternativa viable para la remoción de este herbicida en una solución acuosa.

Palabras clave: Fibra; Carbón; Activación Química; Adsorción; Diuron.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos esenciales para el desarrollo y supervivencia humana. Se sabe que el uso de agua dulce a nivel mundial se ha multiplicado por seis en el último siglo.⁽¹⁾ Debido al desarrollo industrial, producción agrícola, factores naturales la calidad del agua enfrenta graves desafíos afectando a ríos y océanos indispensables para la vida afectando al desarrollo social y la salud humana.⁽²⁾ El sector industrial es uno de los principales responsables de la contaminación del agua, entre ellas las industrias de: papel, curtiembre, textil, etc. Ya que liberan sustancias químicas de origen orgánico e inorgánico, residuos biológicos, causando graves afecciones en la salud humana.⁽³⁾

En países subdesarrollados las aguas residuales industriales y municipales se vierten al medio ambiente sin ningún tratamiento previo ya que no cuentan con suficientes instalaciones de saneamiento y tratamiento de aguas residuales.⁽⁴⁾

Al aumentar el número de efluentes contaminados el agua dulce podría llegar a escasear en los últimos años, para el año 2050 se estima que menos del 50 % de la población mundial tendrá acceso a agua limpia y de buena calidad.^(5,6) Razón por la cual científicos e investigadores constantemente buscan solucionar esta problemática con el desarrollo de métodos respetuosos con el medio ambiente para minimizar los efectos adversos de los contaminantes en aguas.^(7,8,9)

Los pesticidas representan una de las principales fuentes de contaminación en el agua.^(10,11,12,13) Debido a su uso excesivo durante la germinación, desarrollo y cosecha de los cultivos, representando el desafío más significativo para el medio ambiente acuático.^(14,15) En las últimas décadas, el Diuron (N-(3,4-diclorofenil)-N-dimetilurea) ha captado un notable interés en la comunidad científica y ambiental debido a su amplio uso como herbicida, particularmente en cultivos de alta demanda económica como la caña de azúcar. Este compuesto, perteneciente a la familia de las fenilureas, es empleado para controlar malezas que afectan el rendimiento de los cultivos, pero su persistencia en el ambiente y potencial toxicidad lo han convertido en un foco de estudio relevante dentro del ámbito de la contaminación agrícola y el manejo sostenible de recursos hídricos.⁽¹⁶⁾ El Diuron ha contaminado diversas fuentes de agua mediante los canales de riego de cultivos, también, las industrias que fabrican este herbicida liberan residuos que contribuyen a su presencia como contaminante.⁽¹⁴⁾ El Integrated Risk Information System ha ubicado al Diuron como uno de los principales contaminantes debido a su potencial toxicidad.⁽¹⁷⁾ Estableciendo una concentración máxima de 0,1 µg/L⁽¹⁸⁾ ya que en concentraciones superiores podría ser causante de enfermedades cancerígenas.⁽¹⁹⁾

Estudios han demostrado que los materiales adsorbentes han presentado altos porcentajes en la remoción de Diuron.⁽²⁰⁾ Además, son materiales eficientes, respetuosos con la naturaleza y de bajo costo.⁽²¹⁾ El carbón activado a base de material orgánico es uno de los materiales con mejores rendimientos en la remoción de Diuron.⁽²²⁾ Varios derivados de biomasa residual han sido utilizados para la obtención de carbón activado: tronco de palma,⁽²³⁾ residuos de madera,⁽²⁴⁾ cáscara de trigo⁽²⁵⁾ entre otros.

La Cabuya Negra (*Agave americana* L.) pertenece a la familia de monocotiledóneas Agavaceae ampliamente distribuida en América del Sur, esta planta es conocida por sus largas hojas verdes de bordes espinosos. A pesar de estar disponible no tiene un valor económico significativo.⁽²⁶⁾ Las fibras de *Agave* están compuestas principalmente por tres componentes químicos fundamentales: celulosa (aproximadamente 80 %), lignina (15 %) y hemicelulosa (5 %). Sus propiedades adsorbentes se han observado en algunos estudios para la eliminación de contaminantes como Cr y colorantes.⁽²⁷⁾

No se han realizado estudios previos para el análisis como potencial adsorbente de este residuo para herbicidas. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo la obtención de carbón activado a partir de fibras de Cabuya Negra (*Agave americana* L.) mediante activación química utilizando ácido fosfórico. El material carbonoso se utilizó para eliminar el herbicida Diuron en soluciones acuosas. En primer lugar, se realizaron análisis de caracterización tanto en el material original como en el carbonizado para evaluar las modificaciones químicas y estructurales generadas durante el proceso de pirólisis. A continuación, se efectuaron estudios para determinar el pH óptimo y finalmente la cantidad adecuada de adsorbente a utilizar para la remoción del Diuron.

MÉTODO

Obtención de fibra a partir de Cabuya Negra (*Agave americana L.*)

Para este estudio, se recolectaron ocho hojas maduras de cabuya negra (*Agave americana L.*) recolectadas en la Parroquia de Punín, cada una con un peso aproximado de 2,1 kg, sumando un total de 16,8 kg de materia prima. Las hojas fueron sometidas a un tratamiento físico-mecánico que consistió en un golpeado y raspado manual, destinado a retirar la mayor cantidad de pulpa y goma presentes en su superficie. Posteriormente, se lavaron con agua corriente y se dejaron secar al aire hasta alcanzar un nivel adecuado de humedad. Las fibras obtenidas fueron colocadas en remojo con agua destilada durante 72 horas, lo que permitió una remoción manual más eficiente de los restos de pulpa. Finalmente, para eliminar la lignina y obtener fibras purificadas, se empleó un tratamiento químico con una solución de 35 g/L de hidróxido de sodio (NaOH) a una temperatura de 90 °C, dejándolas listas para su caracterización y posterior activación.

Obtención del carbón activado

Para el proceso de pirólisis se utilizó un reactor tipo batch con una capacidad de 5 litros, mismo que cuenta con un condensador de gases, también se utilizó nitrógeno para purgar el equipo generando así un ambiente inerte evitando así posibles reacciones de ignición.

El proceso de carbonización se desarrolló a una temperatura de 450 °C incrementando a una tasa controlada de 12 °C por minuto, durante 2 horas y 30 minutos, con una presión interna de -0,05 MPa.

Activación química

Para esto se utilizó una relación de 1:8 relacionando el peso de materia prima con respecto al volumen de solvente utilizado. En este proceso, se emplearon 50 g de carbón obtenido en pirólisis el cual fue mezclado con 400 mL de ácido fosfórico, luego de ser homogenizado la mezcla se lavó con agua destilada por repetidas veces y se dejó secar durante 72 horas.

Caracterización del carbón activado

Análisis proximal del carbón activado

Se realizó un análisis proximal en carbones activados en el Laboratorio de Procesos Industriales para determinar la humedad, la materia volátil, las cenizas y el carbono fijado.

Análisis Termogravimétrico

El análisis se llevó a cabo bajo una atmósfera de nitrógeno en un equipo TGA-1 Mettler Toledo en un rango de temperatura de 25 °C a 700 °C, con una tasa de calentamiento de 20 mL/min.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se prepararon las muestras se prepararon recubriendo el material con una capa fina de oro se utilizó un equipo modelo JSM-IT100LA.

Espectroscopía Infrarrojo (FTIR)

Los grupos funcionales presentes en el carbón activado antes y después de la activación química con H₃PO₄ se analizaron utilizando un equipo de modelo FTIR-4000-100. Los espectros se escanearon en un rango de 4000 cm⁻¹ a 400 cm⁻¹ con una resolución de 4 cm⁻¹.

Adsorción de Diuron con carbón activado de Cabuya Negra (*Agave americana L.*)

Para elaborar la curva de calibración se consideraron los siguientes volúmenes 0,25; 0,5; 1,2 y 4 ppm tomados a partir de una solución madre de 500 ppm de Diuron en agua destilada, se utilizó un equipo UV-VIS Termo modelo Helios B de 190 a 1100 nm.

Para los ensayos de adsorción se prepararon dos soluciones de 100 ml y 50 ml de diuron al cual se adicionó 0,25 y 0,5 gramos de carbón activado, se agitó durante 4 horas con la ayuda de agitadores magnéticos, posterior a esto se filtró las muestras para tomar 1mL de cada una de ellas para ser aforadas a 25 mL con agua destilada, se replicó por triplicado cada ensayo durante las lecturas de UV-VIS. Se aplicó un diseño experimental 2K con un análisis de varianza ANOVA.

RESULTADOS

Fibra de Cabuya Negra (*Agave americana L.*)

Después de un tratamiento físico-mecánico aplicado sobre las hojas maduras de cabuya negra (*Agave americana L.*), se logró separar la fibra de la pulpa, después de un remojo de 72 horas se logró separar el material no deseado finalmente se removió la lignina utilizando una solución de NaOH a 90 °C. El rendimiento fue de 5,95 %, es decir a partir de 16,8 kg de materia prima se obtuvo 1,0 kg de fibra.

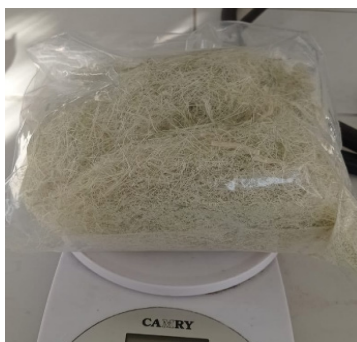


Figura 1. Fibra de Cabuya Negra (*Agave americana* L.)

Obtención del carbón activado

Este tratamiento resultó eficiente en la eliminación de compuestos volátiles, teniendo como resultado un material carbonizado ideal para la activación química y caracterización.

Activación química

Para este proceso, se utilizó una relación de 1:8 entre el peso de la materia prima y el volumen del activante. En particular 50 g de carbón puro fueron tratados con 400 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) puro durante 24 horas. La mezcla obtenida se mantuvo en condiciones de agitación y se sometió a un proceso de lavado y secado posterior, lo que permitió la obtención del carbón activado con las características deseadas. El proceso alcanzó un rendimiento de 30,83 %.

Caracterización del carbón activado

Análisis proximal del carbón activado

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos en el análisis proximal del carbón obtenido se observa que los valores expresados en porcentaje del contenido de humedad, materia volátil y cenizas son bajos en relación con el carbón fijo cuyo valor fue de 85,68 %, el material muestra estar constituido por un alto porcentaje de carbono fijo esto debido a la activación con ácido fosfórico el cual promueve la deshidratación del material facilitando la formación de material poroso ideal para procesos de adsorción.

Tabla 1. Análisis proximal del carbón activado de cabuya negra (*Agave americana* L.)

Análisis próximo	Porcentaje
Contenido de humedad	0,073
Contenido de materia volátil	0,906
Contenido de cenizas	11,8
Contenido de carbón fijo	85,68

Análisis Termogravimétrico

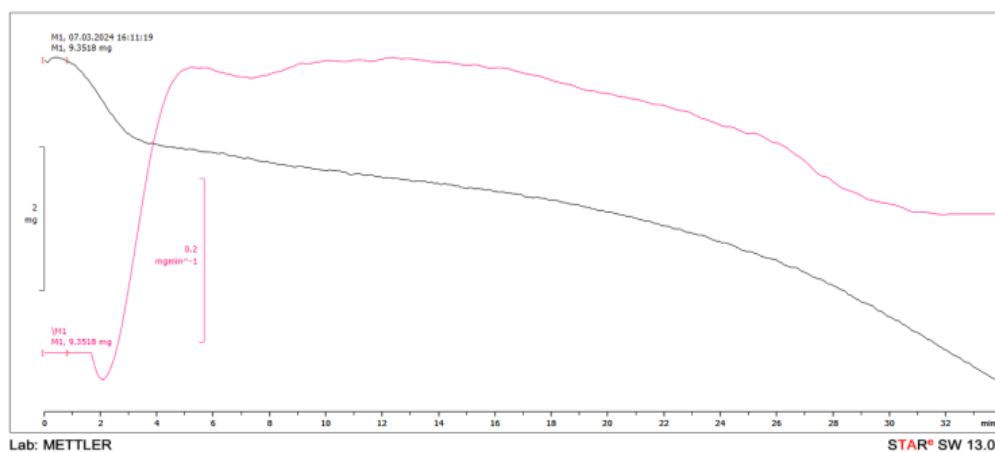


Figura 2. Análisis termogravimétrico del carbón activado de cabuya negra (*Agave americana* L.)

La figura 2 muestra la curva de descomposición térmica del carbono activado obtenido a partir de cabuya negra (*Agave americana* L.). En el primer pico endotérmico en un tiempo de 4 min se le asigna la pérdida de agua catalizada por ácido fosfórico. Además, se observó otro pico endotérmico en un tiempo de 6 min asociado a la pérdida de ácido fosfórico, que tiene un punto de ebullición de ~ 158 °C. Esta segunda etapa se relaciona con la condensación del ácido fosfórico, que se inicia a los 104 °C. Por lo tanto, los cambios observados en el perfil de descomposición térmica se explican por la deshidratación del agente activador durante el proceso, promoviendo la liberación de una molécula de agua a expensas de la liberación de compuestos orgánicos oxigenados o hidrocarburos. De esta manera se forman los compuestos aromáticos menos susceptibles a la volatilización. Con este hecho, se demuestra que la impregnación con ácido fosfórico se fija sobre el carbono, aumentando su porcentaje en el producto final.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Mediante SEM en la figura 3 se observa los cambios morfológicos después del proceso de activación química. La figura 3-b muestra una morfología mesoporosa significativa, así como una gran cantidad de canales de forma irregular en la sección longitudinal. En la figura 3-c, se puede observar que se formaron estructuras mesoporosas y macroporosas, así como canales de formas regulares y tamaños irregulares en la sección longitudinal.

Los cambios físicos observados después del proceso de activación se pueden relacionar con la estructura y disposición de sus constituyentes, que se distribuyen en diferentes capas. Así, se sabe que la lámina media está constituida principalmente por lignina, y las cadenas de celulosa y hemicelulosas forman las paredes celulares. Este resultado se atribuye a que la cabuya negra tiene altos contenidos de celulosa y bajos contenidos de lignina. Con base en las observaciones realizadas y el mecanismo de activación del H_3PO_4 , se pueden inferir algunos de los procesos que están sucediendo durante la activación. Una vez que el H_3PO_4 , se fusiona comienza a reaccionar con el precursor favoreciendo las reacciones de deshidratación. Este mecanismo de deshidratación rompe las interacciones más débiles con otras cadenas lo que facilita el deslizamiento de las cadenas poliméricas con la consecuente formación de la fase fluida. A continuación, la corta interacción entre el H_3PO_4 y los grupos OH terminales promueve la formación de puentes de fosfato y polifosfato que provocan la expansión y reticulación de la matriz carbonada dando como resultado la formación de la estructura porosa accesible después de la eliminación del ácido en el proceso de lavado final. Es fundamental que, mientras se lleva a cabo la consolidación de la estructura carbonosa, los gases generados intenten emerger a través de la fase fundida, por lo que la difusión de estos gases a través de la fase fluida desarrolla vías que se solidifican durante la activación, las cuales son las responsables de la consolidación de las estructuras porosas en el carbón activado obtenido.

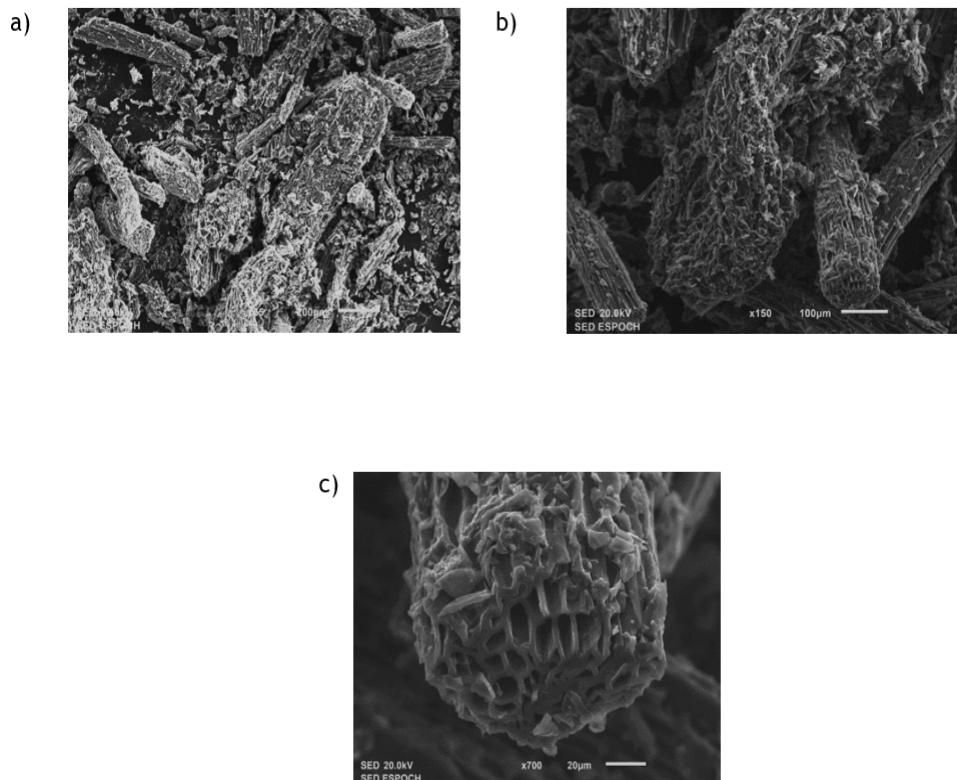


Figura 3. Micrografías SEM de carbón activado de cabuya negra (*Agave americana* L.) con H_3PO_4 . a) x 65 b) x150 c) x700

Análisis EDS

La figura 4 muestra los resultados del análisis EDS sobre el carbón activado mostrando una composición elemental característica predominando ciertos elementos clave C, O y P. El carbono es el principal elemento que aparece en mayor porcentaje, esto se debe a que es el principal componente del carbón activado. Además, se detecta un pico significativo de oxígeno, esto se debe a la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón.

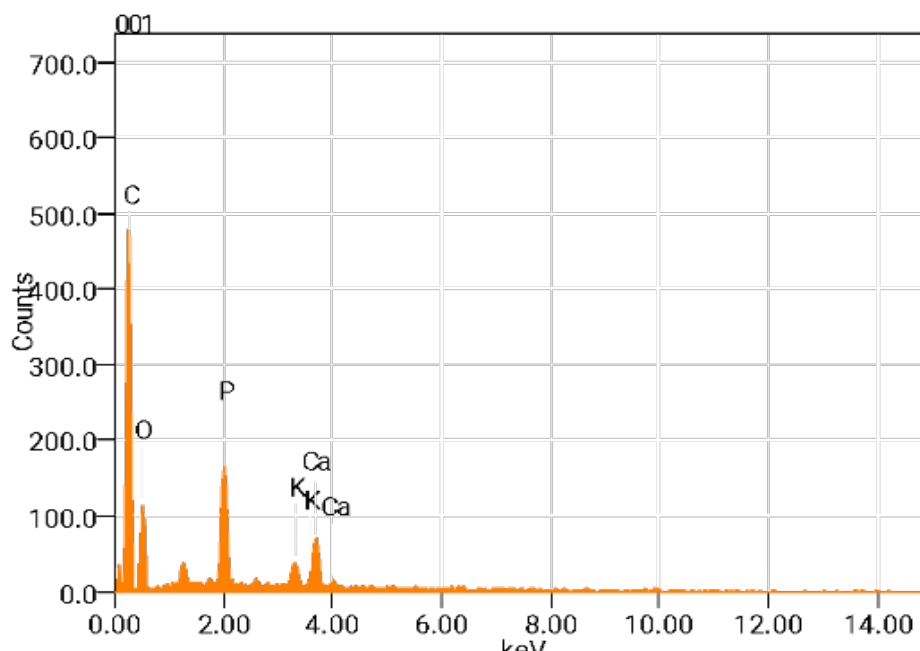


Figura 4. Análisis EDS del carbón activado de cabuya negra (*Agave americana* L.)

El fósforo aparece en un pico bastante definido esto se debe uso de ácido fosfórico (H_3PO_4) como agente activante del material carbonoso, confirmando que el fósforo se integró de manera efectiva en la estructura del carbón. También, se puede observar señales de calcio y potasio en proporciones más bajas, estos probablemente provienen de la materia prima ya que es conocida por contener estos minerales.

Tabla 2. Resultados de EDS del carbón activado de cabuya negra (<i>Agave americana</i> L.)						
Formula	Mass %	Atom %	Sigma	Net	K ratio	Line
C	11,22	71,26	0,13	2403	0,0500333	K
O	5,16	24,60	0,13	584	0,0133815	K
P	1,08	2,65	0,02	1514	0,0109451	K
K	0,23	0,45	0,01	314	0,0023819	K
Ca	0,54	1,03	0,02	770	0,0058362	K
Total	18,23	100				

Espectroscopía Infrarrojo (FTIR)

Los espectros FTIR del carbón obtenido se muestran en la figura 5 antes y después de la activación con ácido fosfórico (H_3PO_4), donde se puede observar que algunos picos han desaparecido y otras intensidades disminuyeron su tamaño. La activación con ácido fosfórico indujo una reducción significativa en la intensidad del pico presente en el rango $3200-3450\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilo (-OH).⁽²⁸⁾ Los espectros también mostraron la desaparición del grupo C=O en el carbón activado con (H_3PO_4) que absorbe a 1744 cm^{-1} y corresponde al estiramiento en ésteres, aldehídos, grupos cetonas y derivados de acetilo.⁽²⁹⁾ Algunos picos presentes en la región $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a las vibraciones de estiramiento C-O y/o C-O-C en fenoles, ácidos, alcoholes, grupos éster y/o éteres también desaparecieron, especialmente los picos a 1253 y 1168 cm^{-1} .⁽³⁰⁾

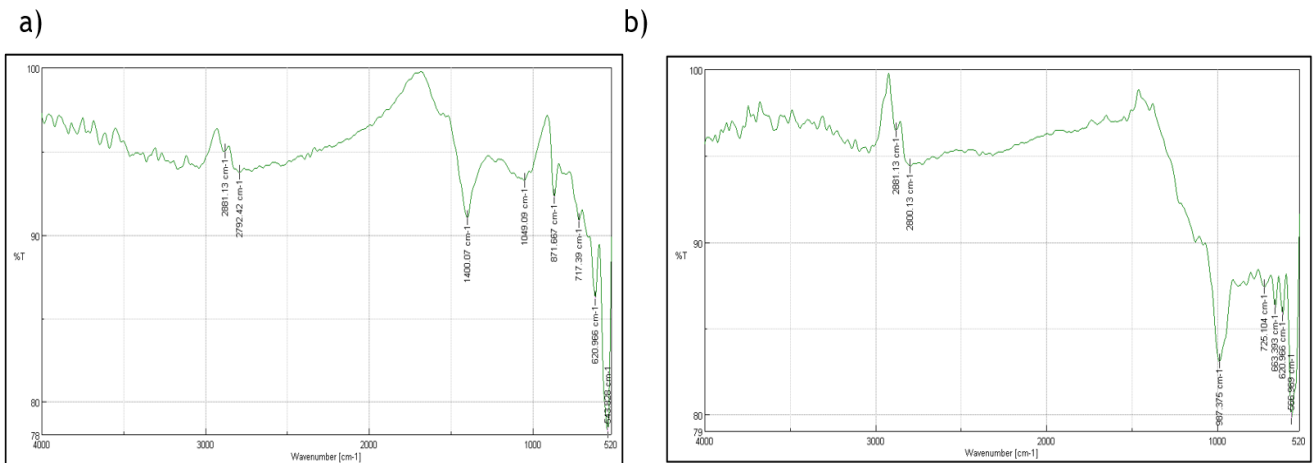


Figura 5. Espectros FTIR: a) antes de la activación química b) después de la activación química

Adsorción de Diuron con carbón activado de Cabuya Negra (*Agave americana L.*)

Una vez realizada la curva de calibración se determinó que el Diuron tiene una absorbancia a una longitud de 249 nm, con un coeficiente de relación R² de 0,998 presentando una buena linealidad para todos los tratamientos.

La tabla 3 muestra los porcentajes de adsorción del diuron utilizando cantidades variables de carbón activado, como se puede evidenciar el tratamiento 3 mostró mejor efectividad con un porcentaje de adsorción del 63,39 %. Demostrando que la eficiencia en la remoción de diuron es mayor cuando las concentraciones son bajas ya que existe menor saturación de los sitios activos y una mejor difusión de las moléculas de diuron en la superficie del adsorbente.

Tabla 3. Resultados de adsorción de Diuron

Tratamientos	Descripción	Réplicas	Porcentaje de adsorción de diuron (%)	Capacidad de adsorción de carbón activado (mg/g)
T1	50 ppm de diuron y 0,25 g de carbón activado	R1	34,42	3,44
		R2	8,94	0,89
		R3	19,84	1,98
T2	50 ppm de diuron y 0,5 g de carbón activado	R1	43,2	2,16
		R2	31,16	1,56
		R3	38,96	1,94
T3	100 ppm de diuron y 0,25 g de carbón activado	R1	63,03	25,21
		R2	63,39	25,36
		R3	63,11	25,24
T4	100 ppm de diuron y 0,5g de carbón activado	R1	55,04	11,01
		R2	59,09	11,82
		R3	54,4	10,88

Se realizó un análisis estadístico ANOVA donde se evaluó el efecto de la concentración inicial de diuron (A), la cantidad de carbón activado (B) y su interacción (A*B). La tabla 4 muestra los resultados obtenidos mostrando diferencias significativas entre los factores evaluados.

Tabla 4. Resultados ANOVA adsorción de Diuron

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p
A	1	2757,30	2757,30	53,10	0,000
B	1	72,42	72,42	1,39	0,272
A*B	1	425,78	425,78	8,20	0,021
Error	8	415,44	51,93		
Total	11	3670,95			

La interacción A*B resultó significativa con un valor $p = 0,021$; esto indica que la combinación de la concentración de diuron y la cantidad de carbón activado se ve afectada de manera conjunta en la eficiencia del proceso. La eficiencia de adsorción depende de la relación equilibrada entre la cantidad de contaminante y material adsorbente.

DISCUSIÓN

Una vez obtenida la fibra a partir de Cabuya Negra (*Agave americana L.*) tras diversos tratamientos mecánicos y químicos para eliminar la mayor cantidad de residuos de celulosa y lignina se obtuvo carbón activado por pirólisis y activación química se obtuvo un material cuyo rendimiento fue de 30,83 %. El contenido de cenizas fue de alrededor del 11,8 % del material, lo que indica que una gran parte de la biomasa fue eliminada o transformada durante la etapa de pirólisis. Cabe destacar que varios estudios en la literatura que utilizan otras biomásas vegetales, con cloruro de zinc ($ZnCl_2$) en una proporción 1:1, obtuvieron resultados similares.^(31,32,33) El estudio realizado por Oliveira et al.⁽³⁴⁾ utilizó bagazo de yuca para producir carbón activado cuyo rendimiento fue de $4,1 \pm 0,8$ % utilizando hidróxido de sodio (NaOH) durante la etapa de pirólisis, los resultados obtenidos muestran la efectividad del ácido fosfórico para el proceso de activación del carbón.

Los resultados obtenidos en la espectroscopía por FTIR resultó ser útil ya que se evidenció la presencia de grupos funcionales presentes antes y después de la activación química, la banda pequeña en la región de 1378 cm^{-1} presente solo en la muestra antes de la pirólisis muestra las vibraciones de $\delta\text{-O-H}$ y $\nu\text{-C=O}$.⁽²⁹⁾ Sin embargo, la banda en la región de $967,37\text{ cm}^{-1}$ puede estar relacionada con la vibración de estiramiento de CN o CO.⁽³⁵⁾ La banda final en $620,96\text{ cm}^{-1}$ presente en ambos materiales, se atribuye al enlace $\nu\text{-O-H}$.⁽²⁹⁾ Un análisis general muestra que, aunque la mayoría de las bandas permanecieron en el material después de pirólisis, la mayoría de ellas perdieron intensidad. Los grupos funcionales primarios fueron metilo, carbonilo e hidroxilo, que son estructuras relacionadas con los subproductos de la degradación de lignina y celulosa.^(36,37)

Se realizó los análisis de microscopía electrónica de barrido para analizar la superficie del material después de la carbonización con ácido fosfórico donde el proceso de carbonización cambia significativamente la morfología y emergieron nuevos espacios.⁽³⁸⁾

El adsorbente mostró una fuerte eficiencia de remoción de Diuron, obteniendo la remoción de 63,39 %. Este desempeño está cerca, o incluso por encima de otros estudios encontrados en la literatura para efluentes simulados que contienen diferentes herbicidas. Al utilizar cáscara de maní tratada con H_2SO_4 para eliminar un efluente que contiene 2,D y atrazina, los autores observaron eliminaciones de 15,01 %; 46,0 % y 72,02 % para las dosis de 1, 3 y 5 g L^{-1} , respectivamente.⁽³⁹⁾ Otro estudio, utilizaron cáscaras residuales de trigo

Fagopyrum esculentum tratadas con H_2SO_4 para tratar muestras de agua de ríos reales contaminadas con 2.4-D.⁽²⁵⁾ Este estudio observó la eliminación de alrededor del 76 % para ambos ríos analizados.

CONCLUSIÓN

Las fibras obtenidas por tratamiento mecánico a partir de Cabuya Negra (*Agave americana L.*), se carbonizaron exitosamente utilizando ácido fosfórico como agente activador. La presencia principal de carbono (85,68 %) después del proceso de pirólisis demuestra que la carbonización fue efectiva. La carbonización desarrolló varios vacíos distribuidos sobre toda la superficie de la muestra lo cual ayudó a que el material carbonoso adsorbiera Diuron de manera exitosa a un porcentaje de 63,39 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. UN World Water Development Report [Internet]. [citado 16 de enero de 2025]. United Nations World Water Development Reports. Disponible en: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/reports>
2. Xu X, Yang H. International Journal of Environmental Research and Public Health. 16-03-2022 [citado 16 de enero de 2025]. Theoretical Model and Actual Characteristics of Air Pollution Affecting Health Cost: A Review. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/6/3532>
3. Conroy RM, Elmore-Meegan M, Joyce T, McGuigan KG, Barnes J. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. The Lancet. diciembre de 1996;348(9043):1695-7.
4. Olmstead S, Zheng J. Review of Environmental Economics and Policy. [citado 16 de enero de 2025]. Water Pollution Control in Developing Countries: Policy Instruments and Empirical Evidence. Disponible en: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/715645?journalCode=reep>
5. Boretti A, Lorenzo R. nature water. 2019 [citado 16 de enero de 2025]. Reassessing the projections of the World Water Development Report | npj Clean Water. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41545-019-0039-9>

6. Kamani H, Zehi MH. Sonocatalyst degradation of catechol from aqueous solution using magnesium oxide nanoparticles. *Global NEST Journal*. 18 de febrero de 2023;89-94.
7. Yuan J, Li Y, Shan Y, Tong H, Zhao J. Effect of Magnesium Ions on the Mechanical Properties of Soil Reinforced by Microbially Induced Carbonate Precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. noviembre de 2023;35(11):04023413.
8. Abdipour H, Hemati H. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. [citado 16 de enero de 2025]. Sonocatalytic process of penicillin removal using - Fe₂O₃ / effect of different parameters / degradation mechanism/ kinetic study/optimisation with response surface model. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/370796923_Sonocatalytic_process_of_penicillin_removal_using_-_Fe2O3_effect_of_different_parameters_degradation_mechanism_kinetic_studyoptimisation_with_response_surface_model
9. Younas U, Ameen M, Perviaz M, Shahzadi G, Fatima A, Ali F, et al. Sodium alginate-supported AgSr nanoparticles for catalytic degradation of malachite green and methyl orange in aqueous medium. *Nanotechnology Reviews* [Internet]. 1 de enero de 2024 [citado 16 de enero de 2025];13(1). Disponible en: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ntrev-2023-0203/html?srsltid=AfmBOoryu_Uhb_azCiq5lQkx4GB3zOCaZJfhYCYDqQE8Q0P4VT83K7gD
10. Syafrudin M, Kristanti RA, Yuniarto A. The National Center for Biotechnology Information. [citado 16 de enero de 2025]. Pesticides in Drinking Water—A Review. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/2/468>
11. Liu W, Huang F, Zhang J. PubMed. [citado 16 de enero de 2025]. Treatment of Cr(VI)-containing Mg(OH)₂ nanowaste. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18567040/>
12. Sharma A, Kumar V, Shahzad B. | Semantic Scholar. [citado 16 de enero de 2025]. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Worldwide-pesticide-usage-and-its-impacts-on-Sharma-Kumar/4bada922c95ea285dfb532926f2d39eee489b947>
13. Yadav IC, Devi NL, Syed JH, Cheng Z, Li J, Zhang G, et al. Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: a comprehensive review of India. *Sci Total Environ*. 1 de abril de 2015;511:123-37.
14. Hughes RG, Potouroglou M, Ziauddin Z, Nicholls JC. Seagrass wasting disease: Nitrate enrichment and exposure to a herbicide (Diuron) increases susceptibility of *Zostera marina* to infection. *Mar Pollut Bull*. septiembre de 2018;134:94-8.
15. Lee SJ, Shim JB, Lee SR. First report of *Labyrinthula zosterae* (Labyrinthulomycetes) as the causal pathogen of wasting disease in the seagrass *Zostera marina* in Korea. *Plant Dis*. 25 de febrero de 2021;
16. Li J, Zhang W, Lin Z. National Library of Medicine. [citado 16 de enero de 2025]. Emerging Strategies for the Bioremediation of the Phenylurea Herbicide Diuron - PubMed. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34475856/>
17. Maqueda C, dos Santos Afonso M, Morillo E, Torres Sánchez RM, Perez-Sayago M, Undabeytia T. Adsorption of diuron on mechanically and thermally treated montmorillonite and sepiolite. *Applied Clay Science*. 1 de febrero de 2013;72:175-83.
18. Deng J, Shao Y, Gao N, Deng Y, Tan C, Zhou S, et al. Multiwalled carbon nanotubes as adsorbents for removal of herbicide diuron from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*. 15 de junio de 2012;193-194:339-47.
19. Mohammed AM, Huovinen M, Vähäkangas KH. Toxicity of diuron metabolites in human cells. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 1 de agosto de 2020;78:103409.
20. Sheng Lau K, Zahira N, Xian S. *Polymers*. [citado 16 de enero de 2025]. Chitosan-Bead-Encapsulated Polystyrene Sulfonate for Adsorption of Methylene Blue and Regeneration Studies: Batch and Continuous

Approaches. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/5/1269>

21. Hu J, Zhao L, Luo J. ScienceDirect. [citado 16 de enero de 2025]. A sustainable reuse strategy of converting waste activated sludge into biochar for contaminants removal from water: Modifications, applications and perspectives - ScienceDirect. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422012304>

22. Dotto GL, McKay G. Current scenario and challenges in adsorption for water treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering. 1 de agosto de 2020;8(4):103988.

23. Mohd Noor HM, Lim A, Li C. Scincedirect. [citado 16 de enero de 2025]. Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid onto oil palm trunk-derived activated carbon: Isotherm and kinetic studies at acidic, ambient condition. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/355510287_Adsorption_of_24-dichlorophenoxyacetic_acid_onto_oil_palm_trunk-derived_activated_carbon_Isotherm_and_kinetic_studies_at_acidic_ambient_condition

24. Cansado IPP, Mourão PAM. ScienceDirect. [citado 16 de enero de 2025]. Adsorption of MCPA, 2,4-D and diuron onto activated carbons from wood composites. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318346020_Adsorption_of_MCPA_24-D_and_diuron_onto_activated_carbons_from_wood_composites

25. Franco D, Silva Oliveira LF, da Boit Martinello K, Diel JC, Georjin J, Schadeck Netto M, et al. Transforming agricultural waste into adsorbent: application of Fagopyrum esculentum wheat husks treated with H₂SO₄ to adsorption of the 2,4-D herbicide. 2021 [citado 16 de enero de 2025]; Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/9001>

26. Sánchez-Moreno H, García-Rodríguez L, Recalde-Moreno C. Natural cellulose fibers (Agave Americana L. ASPARAGACEAE) impregnated with magnetite nanoparticles as a novel adsorbent of mercury (Hg) in aqueous solutions. Adsorption. 7 de diciembre de 2024;31(1):16.

27. Rathnayaka RMH, Priyantha N, Gunathilake WSS. Removal of trivalent and hexavalent chromium from aqueous solution using fiber of Agave americana plant and its modified forms. Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects. 1 de noviembre de 2024;2:100029.

28. Shahrokhi-Shahraki R, Benally C, El-Din MG, Park J. High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. Chemosphere. 1 de febrero de 2021;264:128455.

29. Variation in the FTIR spectra of a biomass under impregnation, carbonization and oxidation conditions | Request PDF [Internet]. [citado 16 de enero de 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222191155_Variation_in_the_FTIR_spectra_of_a_biomass_under_impregnation_carbonization_and_oxidation_conditions

30. Bouchelkia N, Tahraoui H, Amrane A, Belkacemi H, Bollinger JC, Bouzaza A, et al. Jujube stones based highly efficient activated carbon for methylene blue adsorption: Kinetics and isotherms modeling, thermodynamics and mechanism study, optimization via response surface methodology and machine learning approaches. Process Safety and Environmental Protection. 1 de febrero de 2023;170:513-35.

31. Hernandez PT, Franco DSP. Investigation of biochar from Cedrella fissilis applied to the adsorption of atrazine herbicide from an aqueous medium. ResearchGate [Internet]. 22 de octubre de 2024 ;10(3). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/358659740_Investigation_of_biochar_from_Cedrella_fissilis_applied_to_the_adsorption_of_atrazine_herbicide_from_an_aqueous_medium

32. Jordana G, Dison F. Development of highly porous activated carbon from Jacaranda mimosifolia seed pods for remarkable removal of aqueous-phase ketoprofen | Request PDF. ResearchGate [Internet]. 22 de octubre de 2024 ; Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/351597471_Development_of_highly_porous_activated_carbon_from_Jacaranda_mimosifolia_seed_pods_for_remarkable_removal_of_aqueous-phase_ketoprofen

33. Franco DSP, Georgin J, Schadeck Netto M. ScienceDirect. . Highly effective adsorption of synthetic phenol effluent by a novel activated carbon prepared from fruit wastes of the *Ceiba speciosa* forest species | Request PDF. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/352775517_Highly_effective_adsorption_of_synthetic_phenol_effluent_by_a_novel_activated_carbon_prepared_from_fruit_wastes_of_the_Ceiba_speciosa_forest_species

34. Bueno de Oliveira AV, Rizzato TM, Bolanho Barros BC. Physicochemical modifications of sugarcane and cassava agro-industrial wastes for applications as biosorbents. ResearchGate [Internet]. 9 de diciembre de 2024 ;7. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/334673620_Physicochemical_modifications_of_sugarcane_and_cassava_agro-industrial_wastes_for_applications_as_biosorbents

35. Boonamnuyvitaya V, Sae-ung S, Tanthapanichakoon W. Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde. Separation and Purification Technology. 15 de marzo de 2005;42(2):159-68.

36. Niazi L, Lashanizadegan A, Shariffard H. Chestnut oak shells activated carbon: Preparation, characterization and application for Cr (VI) removal from dilute aqueous solutions. Journal of Cleaner Production. 1 de junio de 2018;185:554-61.

37. Kanti Sen T, Afroze S. Springer Nature Link. . Equilibrium, Kinetics and Mechanism of Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Adsorption onto Pine Cone Biomass of *Pinus radiata* | Water, Air, & Soil Pollution. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-010-0663-y>

38. Georgin J, Pinto D, Franco DSP, Schadeck Netto M, Lazarotto JS, Allasia DG, et al. Improved Adsorption of the Toxic Herbicide Diuron Using Activated Carbon Obtained from Residual Cassava Biomass (*Manihot esculenta*). Molecules. enero de 2022;27(21):7574.

39. Georgin J, Franco DSP, Netto MS, Picilli DGA, Foletto EL, Dotto GL. Adsorption investigation of 2,4-D herbicide on acid-treated peanut (*Arachis hypogaea*) skins. Environ Sci Pollut Res Int. julio de 2021;28(27):36453-63.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Linda M Flores Fiallos, Sofía Godoy Ponce, Daniel Heredia Jara, Nora Mejía Cabezas

Investigación: Linda M Flores Fiallos, Sofía Godoy Ponce, Daniel Heredia Jara, Nora Mejía Cabezas

Metodología: Linda M Flores Fiallos, Sofía Godoy Ponce, Daniel Heredia Jara

Redacción - borrador original: Linda M Flores Fiallos, Sofía Godoy Ponce, Daniel Heredia Jara, Nora Mejía Cabezas

Redacción - revisión y edición: Linda M Flores Fiallos, Sofía Godoy Ponce, Daniel Heredia Jara, Nora Mejía Cabezas.