

Artículo Original

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES
COMO BIOSORBENTES DE HIDROCARBUROS**

USE OF AGROINDUSTRIAL WASTE AS HYDROCARBONS BIOSORBENTS

Pastora de la Concepción Martínez Nodal^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-2228-2443>
Iván Leandro Rodríguez Rico² <https://orcid.org/0000-0003-1295-5368>
María Hertha Broche Galindo² <https://orcid.org/0000-0001-6380-8750>

¹ Dirección de Grados Científicos, Vice Rectorado de Investigación y Postgrado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Marzo 19, 2024; Revisado: Marzo 26, 2024; Aceptado: Abril 5, 2024

RESUMEN

Introducción:

La contaminación de las aguas por hidrocarburos es una preocupación mundial debido a su impacto ambiental y económico. Se han desarrollado varios materiales sorbentes sintéticos muy efectivos para controlar los derrames de hidrocarburos, pero los costos adicionales de almacenamiento o disposición final son elevados.

Objetivo:

Evaluar residuos agroindustriales (bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino) y sus mezclas, como materiales biosorbentes para la remoción de hidrocarburos en agua.

Materiales y Métodos:

El bagazo natural (BN) y el aserrín de pino (AP) fueron tamizados para obtener una biomasa uniforme. Los estudios se realizan con granulometrías (+1 -2 mm) y (+ 0,315 - 1 mm) para el BN y el AP por los porcentajes máxicos y la homogeneidad de las fracciones. Al material seleccionado se le determinó: humedad, densidad real, densidad aparente, porosidad y Microscopía Electrónica de Barredura (SEM) acoplada a EDX. Para la determinación de la máxima capacidad de sorción (Ca) de BN y AP, se utilizó diésel (32,7 °API). Se realizó un diseño experimental 2². Para el análisis estadístico se utilizó el software *Statgraphics Centurión XV.II*.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Pastora de la C. Martínez, Email: pastoramn@uclv.edu.cu



Resultados y Discusión:

Los resultados obtenidos muestran que la mayor (Ca) se alcanzó con (+0,315 -1 mm) y mezclas 80%BN/20%AP y 50%BN/50%AP. Los resultados obtenidos muestran que la variable más influyente en la (Ca) es la concentración de biosorbente.

Conclusiones:

Se concluye que es posible la utilizar de residuos agrícolas (BN y AP) y sus mezclas como materiales biosorbentes, en tratamientos no convencionales y sostenibles para la remoción de hidrocarburos en agua.

Palabras clave: aserrín de madera; bagazo de caña de azúcar; biosorbentes; mezclas de bisorbentes; remoción de hidrocarburos; residuos agroindustriales.

ABSTRACT

Introduction:

Water pollution by hydrocarbons is a worldwide concern due to its environmental and economic impact. Several highly effective synthetic sorbent materials have been developed to control oil spills, but the additional storage or disposal costs are high.

Objective:

To evaluate agro-industrial wastes (sugar cane bagasse and pine sawdust) and their mixtures, as biosorbent materials for the removal of hydrocarbons in water.

Materials and Methods:

Natural bagasse (NB) and pine sawdust (PS) were sieved to obtain a uniform biomass. The studies are carried out with granulometries (+1 -2 mm) and (+0.315 - 1 mm) for NB and PS for the mass percentages and homogeneity of the fractions. Humidity, real density, apparent density, porosity and Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled to EDX were determined for the selected material. To determine the maximum sorption capacity (Ca) of NB and PS, diesel (32.7 °API) was used. An experimental design 2² was carried out. Statgraphics Centurion XV.II software was used for statistical analysis.

Results and discussion:

The results obtained show that the highest (Ca) was reached with (+0.315 -1 mm) and 80%NB/20%PS and 50%NB/50%PS mixtures. The results obtained show that the most influential variable on (Ca) is the biosorbent concentration.

Conclusions:

It is concluded that it is possible to use agricultural waste (NB and PS) and their mixtures as biosorbent materials, in non-conventional and sustainable treatments for the removal of hydrocarbons in water.

Keywords: Wood sawdust; sugar cane bagasse; biosorbents; bisorbent mixtures; hydrocarbon removal; agro-industrial wastes.

1. INTRODUCCIÓN

El riesgo de la contaminación por residuos de petróleo ha aumentado con el crecimiento del desarrollo industrial y los procesos de exploración, producción y refinación. El aumento en el volumen de aguas residuales oleosas, consideradas residuos tóxicos y

peligrosos y su vertimiento sin la calidad requerida, han generado impactos adversos como, la contaminación del suelo y el agua, razón por la cual el tratamiento de este tipo de contaminantes es fundamental para la protección del medio ambiente, Guerrero, (2022), Huiman y col., (2023), Nenkova y col., (2024). Las tecnologías convencionales para el tratamiento de las aguas oleosas no logran eliminar completamente el aceite suspendido y los elementos disueltos; además, muchos tratamientos químicos implican altos costos iniciales y/o de funcionamiento, y conducen a la producción de lodos peligrosos que se liberan al medio ambiente sin la calidad requerida, obligando al hombre a encontrar nuevas soluciones, EPA, (2000), (Martínez y col., 2005).

Diversos materiales absorbentes han sido utilizados en la remoción de contaminantes orgánicos, como el petróleo, tanto en suelo como en agua, han sido propuestos entre ellos algunos no convencionales, como residuos agrícolas. Estos absorbentes alternativos deben presentar características adecuadas para su utilización a escala industrial, como por ejemplo altas capacidades de absorción (peso de petróleo absorbido por peso de absorbente), abundancia y bajo costo según Duany-Timosthe y col., (2022). Otras características deseables para materiales absorbentes son: facilidad de aplicación, que sean biodegradables y que posean una buena capacidad de retención del contaminante en el tiempo (Valladares-Cisneros y col., 2017), (Díaz-Díaz y col., 2018). Durante los procesos agroindustriales se generan subproductos o residuos, los cuales al no ser reciclados o procesados apropiadamente, generan diversos problemas ambientales. La disposición inadecuada de los residuos ocasiona alteraciones en los diferentes medios abióticos, bióticos y socioeconómicos, e incluso puede llegar a generar pérdidas económicas. Su utilización representa una alternativa que permite mitigar estos impactos negativos. Sin embargo, estos materiales son fuentes especialmente atractivos por su contenido en compuestos químicos (azúcares, pigmentos, fibra alimentaria, proteína, polifenoles, lignina, etc.) y pueden ser potencialmente útiles cuando se les transforma mediante tratamientos químicos o microbiológicos en productos de elevado valor añadido.

En este sentido el aprovechamiento de los residuos agroindustriales como biosorbente de bajo costo, permite dar solución a diferentes problemáticas ambientales originadas tanto por la generación y disposición de estos residuos sólidos. En este sentido Ramírez, (2012) en su trabajo, le da utilidad y un mayor valor agregado a los residuos agroindustriales, representando una posibilidad de expansión para las industrias y apoyando también a la solución de un problema medioambiental. y el tratamiento de residuales líquidos que son vertidos al medio ambiente sin la calidad requerida por otros sectores productivos, que deben ser tratados de forma adecuada y segura para evitar posibles daños al medio ambiente.

Autores como García-Pérez y col., (2001), Ordaz y col., (2011), han utilizado residuos agroindustriales como la cachaza y el bagazo de caña de azúcar en la remoción de HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y HTP (hidrocarburos totales del petróleo) en suelos contaminados con petróleo crudo. Estudios realizados por Martínez, (2017) y Villabona y col., (2017) demostraron que el bagazo de caña de azúcar y el aserrín de cedro (*cedrela odorata l.*) tienen potencialidades como biosorbente de hidrocarburos (diesel) presentes en agua, logrando una remoción significativa. Otros autores como Vargas y Pérez, (2018) y Cabrera y col., (2013) demuestran la eficacia del aserrín para

la remoción de hidrocarburos y colorantes en solución. Estudios realizados por Alea, (2018), demuestran que el bagazo de caña de azúcar, residuos agrícolas de la cosecha de sorgo y sus mezclas, son materiales biosorbentes efectivos en la remoción de colorantes en medio acuoso.

Teniendo en cuenta que los múltiples usos, y la disponibilidad del bagazo de caña de azúcar y el aserrín de madera, el objetivo del presente trabajo es, evaluar residuos agroindustriales (bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino) y sus mezclas, como materiales biosorbentes para la remoción de hidrocarburos en agua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preparación del material biosorbente

El bagazo natural de caña de azúcar (BN) y el aserrín de madera de *Pinus Caribea* (AP) fueron tamizados para obtener una biomasa uniforme. Las muestras de los materiales objetos de estudio, fueron pesadas. Se colocaron en el sistema de tamizado (Serie Tyler: 4 mm, 2 mm, 1 mm y 0,315 mm) y se someten a un proceso de vibraciones durante un período de 10 minutos. Posteriormente se recogen las fracciones depositadas en cada tamiz y se determina el rendimiento de cada una de ellas respecto al total procesado.

2.2. Caracterización de los materiales biosorbentes

Al BN y al AP se le realiza una caracterización físico-química: porcentaje humedad, densidad real, densidad aparente, porosidad, capacidad de sorción cuyos procedimientos se describen a continuación:

2.2.1. Determinación de humedad

Se realiza en una balanza de humedad Sartorius modelo MC 40, a una temperatura de 105°C.

2.2.2. Determinación de la densidad real (Método Picnométrico)

Se emplea un picnómetro de tipo Weld de 50 mL. La técnica consistió en pesar una masa determinada del material la cual se introduce en el picnómetro, luego se le adiciona el solvente (agua destilada), hasta el nivel de enrase.

$$\rho_{real} = \frac{m_{part.}}{V_p - \frac{m_{solv.}}{\rho_{solv.}}} \quad (1)$$

Donde: m_{par} : masa de sólido en gramo (biosorbente), V_p : volumen en mililitros del picnómetro a 20 °C con el solvente y el sólido, m_{solv} : masa del solvente en gramo que se añade al picnómetro hasta el enrase y ρ_{solv} : densidad del solvente (g/mL).

2.2.3. Determinación de la densidad aparente (Prueba en probeta)

Se utiliza una probeta seca y limpia a la cual se le adiciona el material (BN o AP) hasta un determinado volumen (30 mL), luego se pesa la probeta con todo su contenido, y por diferencia se obtiene la masa del sólido.

2.2.4. Determinación de la porosidad

La porosidad de la partícula de un sólido es una medida de la rugosidad y la capacidad de la superficie, se estima a partir de su relación con la densidad, según la ecuación:

$$e = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (2)$$

Donde: ρ_{ap} = densidad aparente y ρ_{real} (g/mL) = densidad real del biosorbente

2.2.5. Microscopía Electrónica de Barredura (SEM) acoplada a EDX

Las muestras se recubrieron con oro sputtering y la microscopía se realiza utilizando un microscopio electrónico de barrido LEO 440i. Este equipo tiene acoplado un sistema 7060 Oxford de espectroscopía de rayos-X por energía dispersiva (EDX), que permite la determinación cualitativa y semicuantitativa de las composiciones químicas.

2.2.6. Determinación de la capacidad máxima de sorción de las mezclas, con el hidrocarburo seleccionado

Para determinar la capacidad de sorción, se adapta la metodología aplicada por Ortiz y col., (2006), Salazar, (2012) basada en el protocolo canadiense *Oil Sorbente: Testing Protocol and Certification Listing Program* y de la norma (ASTM F 726, 1999), en la cual se determina la masa de hidrocarburo sorbido por gramo de material sorbente, mediante la ecuación:

$$Ca = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (3)$$

Donde: Ca = capacidad de sorción (gramo de hidrocarburo/gramo de biosorbente), m_t = masa de material impregnado (peso en gramo del biosorbente e hidrocarburo sorbido) y m_0 = masa en gramo del material biosorbente seco.

2.2.7. Características físico-químicas del hidrocarburo (HC) utilizado

El hidrocarburo (HC) fue suministrado por el Laboratorio de Análisis de la Empresa Comercializadora de Combustible Villa Clara (ECC-VC), perteneciente a Cuba Petróleo (CUPET). Sus características físico-químicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del diésel utilizado en la determinación de la máxima capacidad de sorción (Ca) de las mezclas (BN y AP)

<i>Propiedades</i>	<i>Diésel regular</i>
Densidad a 15 ⁰ C	0,8556 g/cm ³
Gravedad ⁰ API	32,7 ⁰ API
Punto de inflamación	63 °C
Destilación:	
Temperatura inicial:	214 °C
Temperatura al 50%:	289 °C
Temperatura al 90%:	355 °C
Temperatura final:	371 °C

2.2.8. Determinación de la máxima capacidad de sorción de forma estática

Se realiza con el hidrocarburo seleccionado, las dos granulometrías seleccionadas y tomando cantidades de 1g (concentración del bisorbente: 20 g/L) y 2 g (concentración del bisorbente: 40 g/L) de mezcla a diferentes proporciones (50%BN/50%AP, 80%BN/20%AP y 20%BN/80%AP), como alternativa de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente según Vargas, y Pérez, (2018) y estudios realizados por Martínez, (2017). Pesar el material biosorbente o sus mezclas (m_0), se coloca en un recipiente y se le añade 50 mL hidrocarburo (diesel). Se deja un contacto durante 15 minutos a presión atmosférica y temperatura ambiente. Luego se filtra por escurrimiento (1 hora) a través de un embudo con de malla 0,125 mm (120 Mesh) y se cuantifica la ganancia en peso por el método gravimétrico (m_t). El procedimiento utilizado se muestra en la figura 1.

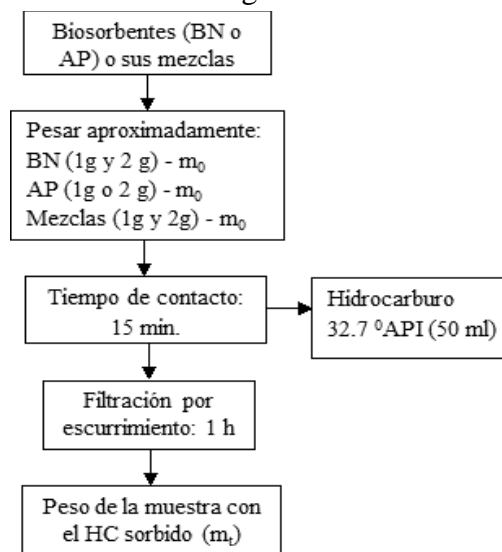


Figura 1. Procedimiento para la determinación de máxima capacidad de sorción de forma estática

Para los ensayos gravimétricos se utilizó una balanza analítica marca DENVER INSTRUMENT modelo TB-224^a, $d^*=0,0001g$. Directiva N0 90/384/CEE para balanza de funcionamiento no automático aplicable en los estados miembros de la comunidad europea. Los cálculos fueron programados y procesados en Excel y para el análisis estadístico se utilizó el software *Statgraphics Centurión XV.II*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1 y 2 se muestra el rendimiento en % de cada una de las fracciones obtenidas con respecto al total de BN y AP, en el proceso de tamizado realizado.

Teniendo en cuenta los porcentajes máxicos y la homogeneidad de las fracciones, se decide realizar los estudios con granulometría (+1 -2 mm y +0,315 - 1 mm) para el BN y el AP. Esto resultaría operacional y económicamente ventajoso, de ser efectivas para el tratamiento de residuales líquidos contaminados con hidrocarburos. Lo anterior se evidencia en estudios realizados por Belisário, (2009) donde corroboró que el proceso de remoción de hidrocarburos está influenciado, por el diámetro de las partículas, altura del empaque, tiempo de contacto entre las fases (sólido-líquido) y la concentración inicial del hidrocarburo en el residual a tratar.

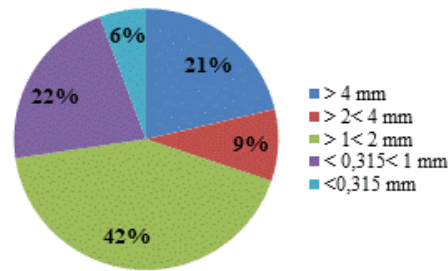


Figura 1. Análisis granulométrico de la operación de tamizado del BN

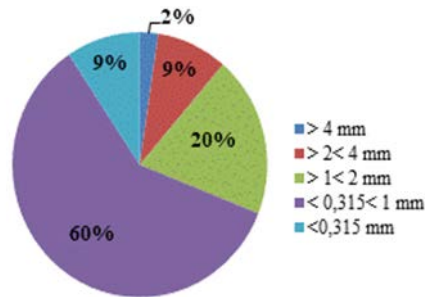


Figura 2. Análisis granulométrico de la operación de tamizado del AP

3.1. Resultados de la caracterización químico física realizada a los biomateriales objeto de estudio

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 2 y 3:

Tabla 2. Valores medios de las propiedades físicas del BN

<i>Propiedad física</i>	<i>Valor promedio material grueso (+1 -2 mm)</i>	<i>Valor promedio material fino (+0,315 - 1 mm)</i>
Humedad a 105°C (%)	13,58 ± 0,18	6,21 ± 0,53
Densidad aparente (g/mL)	0,0598 ± 0,02	0,0897 ± 0,13
Densidad real (g/mL)	0,1769 ± 0,04	0,1851 ± 0,03
Porosidad	0,6622	0,5153

Tabla 3. Valores medios de las propiedades físicas del AP

<i>Propiedad física</i>	<i>Valor promedio material grueso (+1 -2 mm)</i>	<i>Valor promedio material fino (+0,315 - 1 mm)</i>
Humedad a 105°C (%)	14,04 ± 0,65	13,32 ± 0,45
Densidad aparente (g/mL)	0,2014 ± 0,03	0,253 ± 0,46
Densidad real (g/mL)	0,3245 ± 0,03	0,3595 ± 0,02
Porosidad	0,3794	0,2955

Las propiedades físicas de los sorbentes son fundamentales como criterio para la selección y aplicación en: derrames de hidrocarburos (suelos y cuerpos de agua) o como rellenos en columnas de lecho fijo, entre otros. Es por ello que los métodos utilizados para su determinación deben ser confiables y reproducibles. Los valores obtenidos en la

caracterización realizada a las fracciones seleccionadas, son similares y estadísticamente superiores a los obtenidos por Danglad, (2013) y Castro, (2019).

3.2. Resultados de la caracterización física realizada a los biomateriales objeto de estudio

3.2.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a EDX

En las Figuras 2 y 3 se observan estructuras ventajosas (fibras íntimamente conectadas) para los dos sorbentes (BN y AP). Esto favorece que el hidrocarburo fluya por capilaridad o pueda ser retenido por adhesión. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Ortiz y col., (2006) y Apostolopoulos y col., (2014).

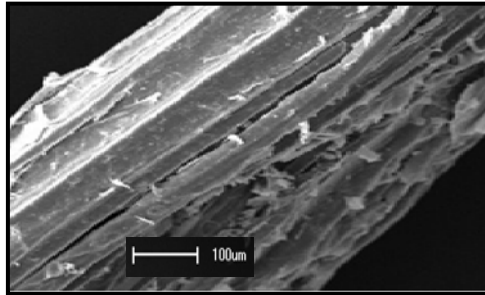


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido (SEM) del BN

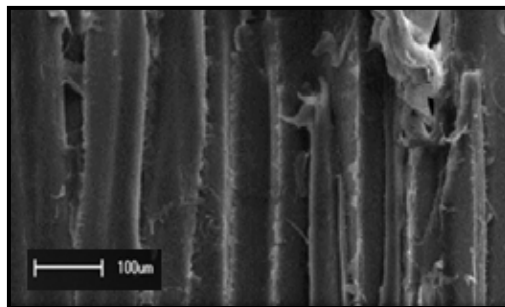


Figura 4. Microscopía electrónica de barrido (SEM) del AP

3.3. Resultados de la capacidad máxima de sorción de las mezclas, con el hidrocarburo seleccionado

Los resultados obtenidos muestran que la máxima capacidad de sorción (C_a) se alcanzó con el material fino (MF): $C_a = 2,77$ g HC/g de BN y con las mezclas 80%BN/20% AP (concentración del biosorbente 20 g/L): $C_a = 2,68$ g HC/g de mezcla y 50%BN/50%AP (concentración del biosorbente 20 g/L): $C_a = 2,13$ g HC/g de mezcla. Al comparar la capacidad de sorción para las dos muestras considerando el tamaño de partículas estudiado, la opción Gráfico de cajas y bigotes indica que para el denominado MF la mediana está por encima de 2,0 y la media cercana a 2,2; mientras que para el MG la mediana y la media están por debajo de 1,6. Adicionalmente, Comparación de medias revela, que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras, puesto que el intervalo no contiene el valor 0 y que ha sido rechazada la hipótesis nula de igualdad de las dos medias para un nivel de confianza de 95 %, ver Figura 5.

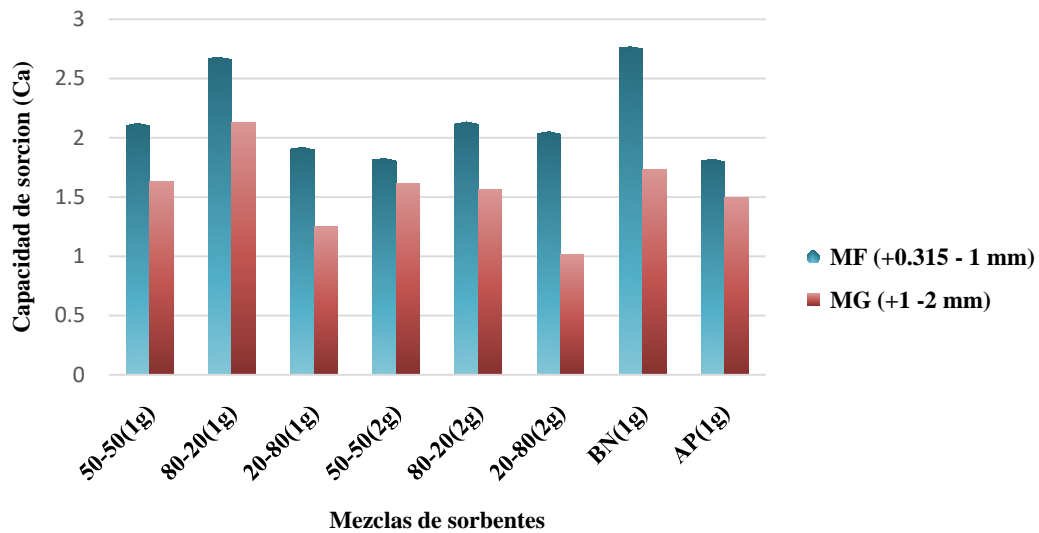


Figura 5. Resultados experimentales obtenidos en la determinación de la capacidad de sorción de hidrocarburos con todas mezclas de BN y AP

En Figura 5 se muestran los valores de capacidad máxima de sorción (Ca) obtenidos con todas las mezclas de BN y AP estudiadas. De acuerdo con resultados obtenidos por Salazar, (2012) utilizando el bagazo natural de caña (BN) y Annunciado y col., (2005) utilizando aserrín de pino (AP), los materiales estudiados y sus mezclas pueden emplearse como sorbentes de hidrocarburos, teniendo en cuenta la capacidad de sorción. Según estudios realizados por Ro y col., (1998), los materiales evaluados se encuentran dentro de la categoría aceptable, para las granulometrías seleccionadas (capacidad de sorción mayor de 1,81 g/g). Sus características son similares a materiales ofertados en el mercado internacional como el 3 MTM microcordines T4, T8, T12, el PV 15 material vegetal particulado, entre otros (Adsorbentes industriales 3MTM, 2013). El buen desempeño, la abundancia, disponibilidad, biodegradabilidad y bajo costo de estos subproductos, los hacen excelentes materiales sorbentes sostenibles. Esto permite reducir considerablemente los costos adicionales de almacenamiento o disposición final que tienen los materiales sorbentes sintéticos, en su mayoría con polipropileno o poliuretano, que tarda en descomponerse 1 000 años (Huang y col., 2012).

3.4. Resultados del diseño de experimento

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la capacidad máxima de sorción de las mezclas, con el hidrocarburo seleccionado, se aplica un diseño 2^2 , considerando como variable independiente la capacidad de sorción (Ca) y las variables independientes que se definen en la tabla 4. Se mantiene la granulometría +0,315 - 1 mm, material fino (MF) y la cantidad de líquido (HC) 50 ml.

Tabla 4. Consideraciones del diseño de experimento utilizado

<i>Variables dependientes</i>	<i>Nivel bajo</i>	<i>Nivel alto</i>
X ₁ : proporción de los biosorbentes en la mezcla	80% BN/20% AP	50% BN/50% AP
X ₂ : Concentración de biosorbente	20g/L	40g/L

3.4.1. Análisis gráfico de los resultados experimentales obtenidos

En la figura 6 se evidencia que la variable que influye en la máxima capacidad de sorción (C_a) es la concentración de biosorbente (X_2).

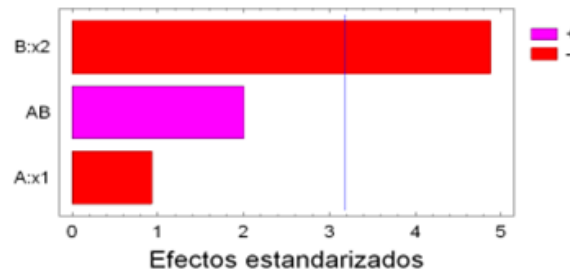


Figura 6. Gráfico de Pareto estandarizado

En la Figura 7 se puede observar que en la medida que disminuye la proporción de BN en la mezcla, disminuye la capacidad de sorción y que al incrementarse la concentración de biosorbente, disminuye la capacidad de sorción. Se sugiere mantener mezclas con contenidos de BN por encima del 50% y emplear la menor concentración de biosorbente. Esto se corrobora al analizar la influencia de la interacción de las variables que aparecen en la Figura 8.

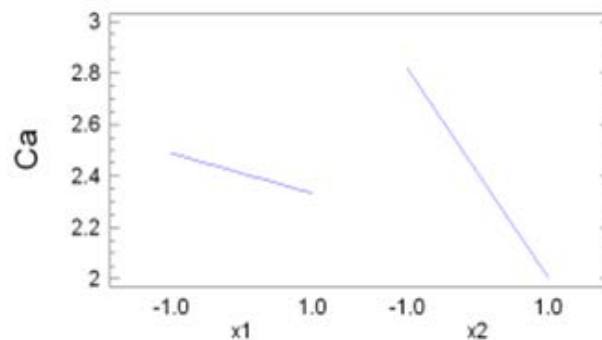


Figura 7. Gráfico representativo de los efectos principales

En la Figura 8 se evidencia la influencia de ambas variables en la máxima capacidad de sorción (C_a) de hidrocarburo. Cuando X_1 toma el valor de -1 y X_2 el de 1, se puede observar que se obtiene el menor valor de C_a . Esto confirma que la condición menos eficiente para trabajar es cuando la concentración de biosorbente es de 40 g/L y una proporción de 50%BN/50%AP. Sucede todo lo contrario cuando X_1 y X_2 alcanzan el valor de -1, donde se obtiene el máximo valor de C_a . Resultando la mejor condición para la sorción de hidrocarburos, cuando la concentración de biosorbente es de 20 g/L y una proporción de 50%BN/50%AP. Estudios realizados por Coca, (2015) y Alea, (2018), corrobora lo sugerido anteriormente, de mantener mezclas con contenidos de BN por encima del 50%.

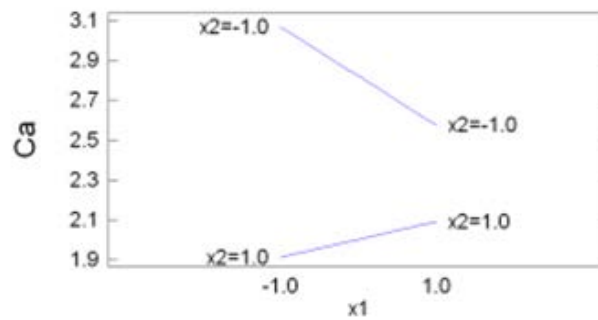


Figura 8. Influencia de la interacción de las variables

4. CONCLUSIONES

1. La caracterización físico-química y estructural realizadas al bagazo de caña de azúcar y al aserrín de pino, indican características que favorecen el comportamiento de estos residuos como biosorbentes y los estudios realizados confirman los elevados valores de capacidades de sorción de hidrocarburos.
2. En esta investigación se demostró que tanto el bagazo de caña de azúcar como el aserrín de pino y sus mezclas tienen buenas capacidades de sorción de hidrocarburos, con mejor desempeño del bagazo de caña y las mezclas con predominio de este biosorbente con respecto al aserrín de pino.
3. El análisis estadístico, realizado a través de un diseño de experimentos 2^2 , caracteriza a la concentración de biosorbente como la variable que más influye en la capacidad de sorción (Ca) de hidrocarburos, empleando mezclas de los biosorbentes estudiados.
4. El bagazo de caña de azúcar, el aserrín de pino y sus mezclas; son materiales biosorbentes de hidrocarburos en aguas residuales, que pueden emplearse alternativamente como tratamientos no convencionales y sostenibles.

REFERENCIAS

- Adsorbentes industriales 3M™, Guía General., Oficinas Centrales, 3M España, S.A. Madrid, 2013. <http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?6666660Zjcf6lVs6EVs66SylGCOrrrQ->
- Alea, J., Estudio de diferentes materiales biosorbentes para la remoción de azul de metileno en medio acuoso., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Facultad de Química y Farmacia, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2018. <https://1library.co/document/y6e0dn4z-estudio-diferentes-materiales-biosorbentes-remocion-metileno-medio-acuoso.html>
- Annunciado, T., Sydenstrikec, T., & Aminco, S., Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills., Marine pollution bulletin, Vol. 50, No. 11, 2005, pp. 1340-1346. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.043>
- Apostolopoulos, G., Fardis, M., Chandrinou, Ch., Giannakopoulos, K., Kontos, A., Bidikoudi, M., Boukos, N., Falarasa, P., Batzias, F., Sidiras, D., & Siontorou, Ch., Experimental design of laboratory measurements for hydrocarbons, salts and dyes

- adsorption on modified lignocellulosic materials in aquatic media., *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 39, 2014, pp. 757-762. <https://doi.org/10.3303/CET1439127>
- ASTM F 726., Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents., 1999. <http://ebookbrowse.com/astm-f726-2006-pdf-d220768065>
- Belisário, M., Estudio comparativo de la eficiencia de adsorción del bagazo de caña de azúcar, carbón activado y esponja vegetal en la remoción del Paracetamol en el suministro de agua. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Química Viña del Mar, Valparaiso, Chile 25 al 28 de Octubre 2009. Disponible desde internet en: <http://www.eiq.cl/cchicq2009/pags/t-oral.html>.
- Cabrera, I., Rodríguez, I. L., Alomá, I., Correa, Y., Potencialidades del uso del aserrín de madera de pino como biosorbente., *Centro Azúcar*, Vol. 40, No. 4, pp. 16-24, 2013. http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/311
- Castro, S.L., Aldrete, A., López, J., Ordaz, V.M., Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino., *Revista Madera y bosques*, Vol. 25, No. 2, 2019, pp. 1-10. <https://doi.org/10.21829/myb/2019.2521520>
- Coca, Y., Remoción de azul de metileno en medio acuoso utilizando residuos agrícolas de sorgo (RAS)., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Facultad de Química y Farmacia, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2015. <https://1library.co/document/z1dlOrdz-remocion-metileno-medio-acuoso-utilizando-residuos-agricolas-sorgo.html>
- Danglad, J.A., Marfisi, S., Cova, S.A., y Linero, G.E., Partículas hidrofobadas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua., *Saber*, Universidad de Oriente, Venezuela, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 97-103. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427739461011>
- Díaz-Díaz, M.Á., Rivas-Trasancos, L., León-Barrios, M., y Acosta-Sánchez, J., Material absorbente para recogida de hidrocarburos en derrames en aguas y suelos., *Revista Cubana de Química*, Vol. 30, No. 2, 2018, pp. 290-298. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v30n2/ind10218.pdf>
- Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horruitiner, T., Rodríguez-Heredia, D., Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión., *Revista Tecnología Química*, Vol. 42, No. 1, 2022, pp. 94-113. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&nrm=iso
- EPA., Title 40 Subchapter I-Solid waste, 258 criteria for municipal solid waste landfills., Environmental Protection Agency, USA, 2000. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-258>
- García-Pérez, M., Chala, A., Yang, J., & Roy C., Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue., Part I: thermogravimetric analysis, *Fuel*, Vol. 80, 2001, pp. 1245–1258. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00215-5)
- Guerrero, M., Análisis de los impactos ambientales generados por el derrame de hidrocarburos transportados en buques en el mar Caribe durante las primeras dos décadas del siglo XXI., Trabajo de grado, Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Ambiental, Montería, Colombia, 2022. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/1916a258-efb2-4154->
-

[98b2-815a9ac85947](#)

- Huang, Z., Wang, N., Zhang, Y., Hu, H., & Luo, Y., Effect of mechanical activation pretreatment on the properties of sugarcane bagasse/poly (vinyl chloride) composites., *Composites Part A*, Vol. 43, 2012, pp. 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.025>
- Huiman, A., Coro, A.L., Guevara, Torpoco, E.E., López, D., Iberos, J.B., Jacob, K.L., Nieto, P.A., Huaman, R.L., Allanpol, R., y Guerra, R.A., Manejo de residuos sólidos peligrosos durante el derrame de hidrocarburo en Ventanilla. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias geográficas*, Vol. 26, No. 52, 2023, pp. 2-8. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25609>
- Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Álvarez, J., Salvarrey, A., y Gristo, P., Guía para la gestión de residuos tóxicos y peligrosos., *Fundamentos Tomo I*, Centro coordinador del convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, Montevideo, Uruguay, septiembre, 2005, pp. 4-162. https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel01_fundamentos.pdf
- Martinez, P., Gestión integral para el tratamiento de las aguas oleosas generadas en las centrales eléctricas que operan con diésel y “fuel oil”., Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2017. <https://dspace.uclv.edu.cu/items/06a517dc-2315-4371-982a-004ca8ee77a0>
- Nejkova, S., Garvanska, R., & Jele, S., Fibrous-wood sorbent for eliminating oil pollution., *AUTEX Research Journal*, Vol. 4, No. 3, 2024, pp. 2-10. <http://www.autexrj.org/No3-2004/0116.pdf>
- Ordaz, J.A., Martínez, A., Ramos, F.R., Sánchez, L.F., Martínez, A.J., Tenorio, J., y Cuevas-Díaz, M.C., Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula., *Multiciencias*, Vol. 11, No. 2, 2011, pp. 136-145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90419195004>
- Ortiz, P., Fonseca, F., Rodríguez G., y Montenegro, L., Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua., *Ingeniería e Investigación*. Vol. 26, No. 2, 2006, pp. 20-27. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v26n2/v26n2a03.pdf>
- Ramírez, S.G., Aprovechamiento de residuos Agroindustriales, cascarilla de arroz (*Oriza sativa*) y residuos de papa (*Solanum tuberosum*) para la producción de *Trichoderma spp.*, Trabajo de Graduación del Título de Ingeniero Bioquímico, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2012. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3063>
- Ro, K.S., Breitenbeck, G.A., & Ghalambor, A., Composting technology for practical and safe remediation or oil spill residuals., Louisiana Applied Oil Spill Research and Development Program, Baton Rouge, Louisiana. Technical Report Series, 97-009, 1998, pp. 215-240. <https://atom.archives.sfu.ca/f-177-1-17-0-38>
- Salazar, E., Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula., Tesis para optar por el grado de Master en Ciencias
-

Ambientales, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 2012.

<http://comunidadpmpca.uaslp.mx/documento.aspx?idT=249>

Valladares-Cisneros, M.G., Valerio, C., de la Cruz, P., y Melgoza, R.M., Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales., Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 16, No. 31, 2017, pp. 55-73.

<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v16n31/1692-3324-rium-16-31-00055.pdf>

Vargas, Y.A, y Pérez, L.L., Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente., Revista Facultad de Ciencias Básicas, Vol. 14, No. 1, 2018, pp. 59-72, <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb>

Villabona, A., Tejada, C., y Tejada, L., Adsorción de diésel en solución acuosa sobre aserrín cedro (*cedrela odorata l.*) en columna de lecho fijo., Revista Investigaciones Andina, Vol. 19, No. 35, 2017, pp. 31-44.

<https://www.redalyc.org/journal/2390/239058067002>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dra.C. Pastora de la Concepción Martínez Nodal. Investigación, supervisión, metodología, redacción - primera redacción.
- Dr.C. Iván Leandro Rodríguez Rico. Supervisión, metodología, redacción - revisión y edición.
- Dra.C. María Hertha Broche Galindo. Redacción - revisión y edición.