

CAPÍTULO 2

Obtención de Carbón Activado a partir de Bagazo de Caña para Descontaminación de Tinidazol en Aguas

*Production of Activated Carbon from Sugarcane Bagasse for the
Decontamination of Tinidazole in Water*

Melisa Andrea Walteros Ospina

Universidad Santiago de Cali. Colombia

© <https://orcid.org/0009-0008-5400-8100>

✉ melisa.walteros00@usc.edu.co

Yhors Alexander Ciro Monsalve

Universidad Santiago de Cali. Colombia

© <https://orcid.org/0000-0003-4093-8696>

✉ yhors.ciro00@usc.edu.co

Resumen

La contaminación de fuentes hídricas es una gran problemática a nivel mundial. El carbón activado producido a partir de desechos agroindustriales ha sido empleado para la remoción de contaminantes emergentes que afectan los cuerpos de agua. Para abordar esta problemática se planteó la obtención de carbón activado a partir del bagazo de caña para la descontaminación de tinidazol en aguas,

Cita este capítulo / Cite this chapter

Walteros Ospina, M. A. y Ciro Monsalve, Y. A. (2026). Obtención de carbón activado a partir de bagazo de caña para descontaminación de tinidazol en aguas En: Ciro Monsalve, Y. A. (ed. científico). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la biorremediación de fármacos en fuentes hídricas*. (pp. 29-55). Cali, Colombia: Universidad Santiago de Cali.

mediante la carbonización de los materiales a diferentes tiempos y temperaturas. Se obtuvo un resultado positivo con la activación física y química del bagazo, sin embargo, el mayor porcentaje de remoción fue obtenido mediante la activación química con ácido fosfórico con un resultado de 78% de remoción del tinidazol. Además, se realizaron análisis de productos farmacéuticos no estériles en este caso no crecieron *Pseudomonas aeruginosa* ni *Staphylococcus aureus* en ningunos de los materiales. Estos resultados demostraron la capacidad de adsorción del bagazo, con lo que se pueden generar alternativas de un segundo uso a los residuos agroindustriales y puedan ser usados como elementos de biorremediación.

Palabras clave: Contaminación, carbón activado, tinidazol, bagazo de caña.

Abstract

Pollution of water sources is a major problem worldwide. Activated carbon produced from agroindustrial waste has been used for the removal of emerging contaminants that affect water bodies. To address this problem, it was proposed to obtain activated carbon from sugarcane bagasse for the decontamination of tinidazole in water, through the carbonization of the materials at different times and temperatures. A positive result was obtained with the physical and chemical activation of the bagasse; however, the highest percentage of removal was obtained through chemical activation with phosphoric acid with a result of 78% removal of tinidazole. In addition, analyzes of non-sterile pharmaceutical products were carried out in this case, neither *Pseudomonas aeruginosa* nor *Staphylococcus aureus* grew in any of the materials. These results demonstrated the adsorption capacity of bagasse, which can generate alternatives for a second use of agroindustrial waste and can be used as bioremediation elements.

Keywords: pollution, activated carbon, tinidazole, sugarcane bagasse.

Introducción

El desarrollo acelerado de actividades urbanas, industriales, agrícolas y farmacéuticas ha provocado el deterioro en el medio ambiente debido a la descarga de aguas residuales con contaminantes emergentes (CE) en grandes cantidades, las cuales tienen como destino cuerpos de agua y suelos. La abundancia de CE en aguas residuales, ríos y océanos ha llamado la atención en años recientes, ya que son perjudiciales para los seres humanos y presentan ecotoxicidad incluso a bajas concentraciones debido a su baja tasa de degradabilidad. Dentro de este grupo de contaminantes, se encuentran los productos farmacéuticos, sus metabolitos y subproductos que, si bien no son considerados como sustancias persistentes, su uso frecuente y eliminación los hace estar presentes en nuestro entorno (Arcos, 2022).

Entre estos compuestos farmacéuticos, los antibióticos, debido a su metabolismo incompleto y a su naturaleza no biodegradable, pueden permanecer en el ecosistema durante largos periodos de tiempo. Uno de ellos, el tinidazol (TND) 1-[2-(etil sulfonil)etil]-2-metil-5-nitro-1H imidazol, se usa ampliamente para la prevención y el tratamiento de infecciones de amebiasis, giardiasis y tricomoniasis vaginal. La aparición de TND en las aguas residuales, incluso en concentraciones menores, presenta consecuencias adversas para el cuerpo humano y el ecosistema. (Qin et al., 2020) reportaron la presencia de TND en sistemas de aguas residuales y de agua dulce. Por lo tanto, se debe abordar la degradación efectiva de TND en las aguas residuales, ya que, debido a su estructura compleja, alta solubilidad acuosa y menor biodegradabilidad, este no puede degradarse por completo mediante estrategias convencionales, pero se han informado varios métodos para su eliminación, incluida la adsorción (Sohani et al., 2022).

Dentro de los tratamientos que han sido probados para la remediación de esta agua contaminada se ha usado la adsorción, un proceso económico y más viable que otros procedimientos, además de que puede ser utilizado como tratamiento de compuestos orgánicos. Se ha encontrado que su efectividad de remoción es específica para algunos CE y que el costo de regeneración es alto (Hinojosa et al., 2021).

Investigaciones concuerdan que procesos de adsorción por carbón activado y tratamientos de oxidación son efectivos para remover CE y esto se debe a las interacciones hidrofóbicas con los compuestos orgánicos polares (Wang, Wang & Dionysiou, 2023). Esto por el resultado de que el carbón activado es un adsorbente más eficaz, especialmente para aguas residuales que contienen materia orgánica recalcitrante y compuestos no biodegradables.

A pesar de ser un material muy eficiente, el costo del carbón activado a menudo restringe su uso, por lo tanto, hay un interés creciente en la búsqueda de diversas fuentes y alternativas para reducir los costos de su producción. Los productos utilizados en la síntesis de carbón activado deben tener un alto contenido de carbono y bajos niveles de compuestos inorgánicos en su estructura, estas dos condiciones las cumplen los desechos sólidos de la agricultura (cáscaras y semillas, madera y bagazo) o mayormente conocidos como residuos agroindustriales (Vidal et al., 2018).

La generación de subproductos o residuos agroindustriales en las diferentes etapas de los procesos productivos es actualmente una problemática a nivel mundial, debido a que en la mayoría de los casos no son procesados o dispuestos adecuadamente, situación que contribuye al proceso de contaminación ambiental. Los residuos agroindustriales poseen un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos, aportar valor agregado a los productos originales y recuperar condiciones ambientales alteradas (Vargas & Pérez, 2018).

La producción mundial anual de 700 millones de toneladas de caña de azúcar da como resultado 210 millones de toneladas de bagazo (Hiranobe et al., 2024). En Colombia, la caña de azúcar ocupa el segundo lugar en extensión, después del café, con 249.384 hectáreas, contribuyendo significativamente al producto interno bruto (PIB) agrícola. El procesamiento de caña de azúcar genera toneladas de bagazo de caña, el cual está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Cueva et al., 2017). Durante el 2022, la agroindustria de la caña colombiana tuvo una producción de: 23

millones de toneladas de caña y 2,09 millones de toneladas de azúcar. Este sector se caracteriza por gestionar de manera eficiente sus residuos y sacarle el mayor provecho a la materia prima fundamental: la caña de azúcar. Con la caña producen azúcar, energía, alcohol carburante y subproductos como el bagazo y la vinaza. El bagazo es utilizado por la industria papelera para la producción de artículos ecológicos y en las fábricas para la sustitución de carbón para las calderas (Asocaña, 2023).

Por esta razón, se planteó la obtención de materiales adsorbentes a partir de bagazo de caña de azúcar mediante procesos de activación física y química con ácido fosfórico. Los materiales fueron caracterizados por espectroscopía infrarroja, medición de pH y humedad y se evaluó la capacidad de remoción *in-vitro* de tinidazol, para así solventar dos grandes problemáticas en el país, el uso de subproductos agrícolas para la obtención de materiales con valor agregado, capaces de remover CE farmacéuticos en aguas.

Materiales y Métodos

Los materiales empleados en esta investigación fueron hipoclorito de sodio (Yes, concentración 3.6%), ácido fosfórico (Protokimica) y tinidazol (Donación). Las cepas de *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 y *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 fueron adquiridas por la Universidad Santiago de Cali, la cual financió esta investigación. El bagazo de caña fue donado por una empresa de la región.

En primer lugar, se realizó el lavado y secado del bagazo de caña, luego se sometió a activación física y química con ácido fosfórico. Una vez obtenidos los materiales adsorbentes se caracterizaron por espectroscopía infrarroja, medición de pH y humedad. Por último, se evaluó la capacidad de remoción *in-vitro* de tinidazol en medio acuoso de cada material obtenido y el bagazo de caña sin ningún tratamiento (térmico o químico).

Recolección y Acondicionamiento del Bagazo de Caña

El bagazo de caña se trató inicialmente con agua hirviendo durante 30 minutos; al finalizar este tiempo, el agua fue retirada. Posteriormente, se sometió a un tratamiento con hipoclorito durante 30 minutos. Luego, se secó en una estufa de bandejas (Binder, ED23, Alemania) a 105 °C durante 24 horas, se trituró y se tamizó hasta alcanzar un tamaño de partícula de 0,15 mm, con el fin de garantizar una mayor área superficial durante los procesos de activación (Vera et al., 2015).

Activación Física del Bagazo de Caña

Se pesaron aproximadamente 10 g de bagazo de caña en una cápsula de porcelana y se sometieron a calcinación en una mufla (Maxtermo, MC5438, Taiwan) variando la temperatura a 600 °C, 750 °C y 900 °C, por tiempos de 1,5 h, 3,0 h y 5,0 h. Los materiales obtenidos en este proceso se denominaron como carbonizado 1 al 8 (Yakout & Sharaf, 2016).

Activación Química del Bagazo de Caña

Se pesaron aproximadamente 10 g de bagazo de caña y se pusieron en contacto con 100 mL de solución de ácido fosfórico (H_3PO_4) a concentración del 10 % (%P/V) durante 1 hora (ya que este es uno de los agentes de activación química más utilizados en este tipo de estudios), a temperatura ambiente, en cabina de extracción y con agitación constante. Posteriormente, la suspensión se dejó decantar, se eliminó el sobrenadante y el precipitado se carbonizó en mufla (Maxtermo, MC5438, Taiwan) a temperaturas de 600 °C, 750 °C y 900 °C por 3 horas. Luego, al material se le realizaron lavados con agua purificada hasta alcanzar un pH neutro, para eliminar los residuos de ácido sin reaccionar, y se llevó a la balanza termogravimétrica (Mettler Toledo, HE53, EE. UU) a temperatura de 120°C para determinar su porcentaje de humedad. Los materiales se denominaron como carbonizado 9 al 11 (Yakout & Sharaf, 2016).

Caracterización de los Materiales Adsorbentes

Rendimiento: Se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso final del material después del tratamiento}}{\text{Peso inicial del bagazo de caña}} * 100\%$$

Análisis infrarrojo: Aproximadamente 15 mg de cada material se mezclaron con 100 mg de bromuro de potasio en un mortero de ágata con ayuda de un pistilo de ágata. Posteriormente, esta mezcla se comprimió en un pellet y su espectro infrarrojo se registró en un espectrofotómetro (IRA-Affinity, Shimadzu, Japon) en el rango de 4000-400 cm^{-1} .

Evaluación de la Capacidad Descontaminante de los Materiales Adsorbentes

Se evaluó la capacidad de remoción de TND por parte del bagazo de caña y de los materiales obtenidos por activación física y química.

En primer lugar, se prepararon 50 mL de solución acuosa de TND a 8 $\mu\text{g}/\text{mL}$, se adicionaron 20 mg de cada material adsorbente y se dejó en agitación constante por 1 hora. Este proceso se realizó por triplicado. Posteriormente, las muestras se centrifugaron y se leyó la absorbancia del sobrenadante a $\lambda = 316 \text{ nm}$, la cual se interpoló en la curva de calibración obtenidas a concentraciones de TND entre 5 a 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ para conocer la concentración sin remover de TND, que se restó a la concentración inicial para hallar el porcentaje de remoción, de acuerdo con la ecuación:

$$\text{Cantidad de remoción de TND (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$$

Dónde C_i es la concentración inicial de la solución de TND y C_f la concentración de la solución de TND luego del proceso de remoción.

Adicionalmente, se realizó un ensayo empleando 50 mL de agua desionizada y el material adsorbente (Blanco) para corregir el posible efecto que pudiera presentar el material adsorbente en la cuantificación del TND.

Análisis Microbiológico de Material Farmacéutico no Estéril

Se realizaron pruebas para determinar la presencia/ausencia de bacterias patógenas como *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* para el bagazo de caña acondicionado y los carbonizados 9, 10 y 11.

Determinación de *Pseudomonas Aeruginosa*

Aproximadamente 500 mg del material adsorbente se inoculó en 5 mL de caldo digerido de caseína y soja en un tubo de ensayo, se mezcló e incubó a 35 °C durante 24 horas. Posteriormente, se tomó 0.1 mL de la mezcla y se sub-cultivó en una placa de agar Cetrimida que se incubó a 35 °C durante 48 horas.

El crecimiento de colonias indica la posible presencia de *Pseudomonas aeruginosa*. Esto se confirma mediante pruebas de identificación. El producto cumple con la prueba si no se desarrollan colonias o si los resultados de las pruebas de identificación confirmatorias son negativos (Farmacopea de los Estados Unidos, 2024).

Determinación de *Staphylococcus Aureus*

Aproximadamente 500 mg del material adsorbente se inoculó en 5 mL de caldo digerido de caseína y soja en un tubo de ensayo, se mezcló e incubó a 35 °C durante 24 horas. Posteriormente, se tomó 0.1 mL de la mezcla y se sub-cultivó en una placa de agar Manitol salado que se incubó a 35 °C durante 48 horas. El crecimiento de colonias amarillas o blancas rodeadas de una zona amarilla indica la posible presencia de *Staphylococcus aureus*. Esto se confirma mediante pruebas de identificación. El producto cumple con la prueba si no se desarrollan colonias de los tipos descritos o si los resultados de las pruebas de identificación confirmatorias son negativos (Farmacopea de los Estados Unidos, 2024).

Prueba de Promoción de Crecimiento

Esta prueba se realizó para establecer que los medios de cultivo permitían el crecimiento apropiado de los microorganismos patógenos a evaluar. Para el caso de *Pseudomonas aeruginosa*, se

tomó 0.1 mL de suspensión de este microorganismo y se inoculó directamente al medio de cultivo por el método de agotamiento en una caja con agar Cetrimida, que se incubó a 35 °C durante 48 horas (Farmacopea de los Estados Unidos, 2024).

Por otra parte, para el caso de *Staphylococcus aureus*, se tomó 0.1 mL de suspensión de este microorganismo y se inoculó directamente al medio de cultivo por el método de agotamiento en una caja con agar Manitol salado, que se incubó a 35 °C durante 48 horas (Farmacopea de los Estados Unidos, 2024).

Resultados y Análisis

A continuación, se presentan los resultados de las diferentes pruebas realizadas en la obtención, caracterización y desempeño de los materiales adsorbentes, así como la explicación del porqué de estos hallazgos.

Recolección y Acondicionamiento del Bagazo de Caña

En la figura 2.1 se presentan los resultados del tratamiento que se realizó al bagazo de caña. Inicialmente, 375.36 g de bagazo de caña se lavaron y desinfectaron para eliminar impurezas y contaminación microbiológica. Luego, se secó, trituroó y tamizó para tener un material con un tamaño de partícula homogéneo, y así garantizar una mejor área superficial durante los procesos de activación. Al final, se obtuvieron 165.38 g de bagazo de caña acondicionado. La pérdida de peso se asocia a la deshidratación ocurrida durante el secado y pérdida de componentes por el tratamiento con hipoclorito de sodio.

Figura 2.1.

Tratamiento del bagazo de caña de azúcar.



Activación Física del Bagazo de Caña

El bagazo de caña de azúcar contiene un 24,7% de carbono con una composición química de hemicelulosa 25%, celulosa 50% y lignina 25%. El alto contenido de celulosa imparte una estructura microporosa al carbón activado (Raut et al., 2022). Por tanto, el bagazo de caña de azúcar se puede utilizar para fabricar carbón activado. Durante el proceso de carbonización a alta temperatura, ocurre pirólisis del material con lo que hay una despolimerización de la celulosa y hemicelulosa, transformándose en unidades más pequeñas (Narayanasamy et al., 2020). Además, se desprende materia volátil y se produce un sólido más rico en carbono. Por ende, en este proceso se pierde gran parte del material durante la carbonización como se observa en la tabla 1, dónde a medida que se incrementa la temperatura en la mufla, se disminuye el rendimiento en la producción del material (Bachrun et al., 2016). Por otra parte, los materiales obtenidos presentaron una coloración café claro.

La tabla 2.1. muestra los datos obtenidos para los carbonizados activados de manera física, el peso inicial y el peso después del tratamiento respectivo, así como el rendimiento en cada caso.

Tabla 2.1.

Condiciones de obtención de los materiales.

# Carbonizado	Temperatura (°C)	Tiempo de pirólisis (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)
1	600	1:30	10.02	0.449	4.5
2	750	1:30	10.00	0.372	3.7
3	900	1:30	9.99	0.350	3.5
4	600	3	10.00	0.310	3.1
5	600	5	10.02	0.198	2.0
6	600	1:30	10.01	0.230	2.3
7	600	3	10.08	0.217	2.2
8	600	5	10.01	0.414	4.1
9	600	3	10.00	1.37	13.7
10	750	3	10.01	0.618	6.2
11	900	3	10.01	1.51	15.1

Activación Química del Bagazo de Caña

La tabla 2.1 muestra los datos obtenidos para los carbonizados activados de manera física (los números 1 a 8) y los activados de manera química con ácido fosfórico (Los números 9 a 11). Se evidencia que la impregnación con este reactivo aumentó el rendimiento ya que facilitó la hidrólisis de la lignina y a la vez, pudo permitir un aumento de la porosidad. Aunque se evidencia en el carbonizado #10 un bajo rendimiento que pudo deberse a la pérdida de material durante el proceso de carbonización.

En el proceso de activación química, se empleó ácido fosfórico como agente activante para la obtención de carbones activados, teniendo varias ventajas con respecto al proceso de activación física, ya que involucra una única etapa de tratamiento térmico, requiere temperaturas considerablemente menores y se alcanzan mayores rendimientos y capacidades de adsorción disminuyendo así los costos del proceso.

Cabe señalar que la activación química con H_3PO_4 sólo se practica con materiales lignocelulósicos (Teng et al., 1998), además, en este proceso el carácter deshidratante del ácido fosfórico aceleró la ruptura de enlaces entre biopolímeros, facilitó la pérdida de hidrógeno y oxígeno, y convirtió unidades carbonadas grandes en unidades más pequeñas con mayor riqueza en carbono (Primera-Pedrozo et al., 2011). El ácido fosfórico aumenta la aromaticidad del carbón, la pérdida del carácter alifático y la formación de un sólido rígido entrecruzado (Teng et al., 1998; Primera-Pedrozo et al., 2011). Los materiales adsorbentes obtenidos presentaron una coloración entre grisácea y negra.

Caracterización de los Materiales Adsorbentes

Rendimiento

Los materiales activados de manera física mostraron resultados cercanos en cuanto a su rendimiento, sin superar el 4.5% en ninguno de los 8 materiales analizados. A diferencia de los materiales

carbonizados activados de manera química, en los que se evidenció un aumento en el rendimiento alcanzando el carbonizado #11 un 15.1% de rendimiento.

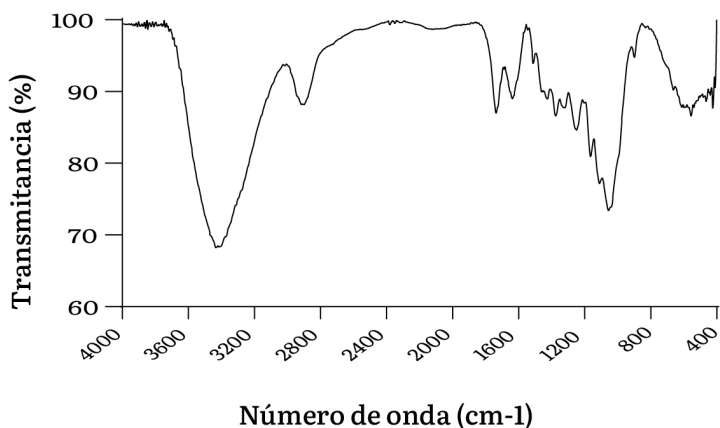
Análisis Infrarrojo

En las figuras 2.2 a 2.12 se presentan los espectros infrarrojos de los diferentes materiales adsorbentes obtenidos, el bagazo de caña y el tinidazol.

La figura 2.2. presenta el espectro del bagazo de caña, donde la banda amplia entre $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ es debida al estiramiento de los enlaces de hidrógeno intramoleculares del grupo OH en la celulosa, la banda entre $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ es por el estiramiento del grupo CH. La banda entre $1700-1800\text{ cm}^{-1}$ es por el estiramiento C-O para los enlaces acetilo y éster en lignina y hemicelulosa. Por otra parte, las bandas entre $1620-1649\text{ cm}^{-1}$, 1512 y 1595 cm^{-1} están asociadas con el anillo aromático presente en la lignina y el agua absorbida, respectivamente (Kumar et al., 2014).

Figura 2.2.

Espectro infrarrojo del Bagazo inicial.



La figura 2.3. muestra la estructura química del TND y la figura 2.4. su espectro infrarrojo. El espectro infrarrojo del TND exhibió una frecuencia vibratoria entre 2800 y 3200 cm^{-1} que se asocia al

estiramiento C-H. Las bandas entre 1400 y 1600 cm^{-1} se atribuyen a estiramientos asimétricos C=C (anillo de imidazol), C=N (anillo de imidazol) y N=O (NO_2). Las bandas que aparecieron entre 1200 y 1400 cm^{-1} se asociaron a estiramiento simétrico N=O, estiramiento asimétrico S=O y estiramiento CO. Por último, las bandas entre 800 y 1200 cm^{-1} se asignaron al estiramiento simétrico S=O y al estiramiento CN (Kumar et al., 2015).

Figura 2.3.

Estructura química del Tinidazol.

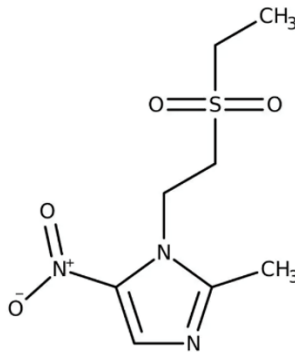
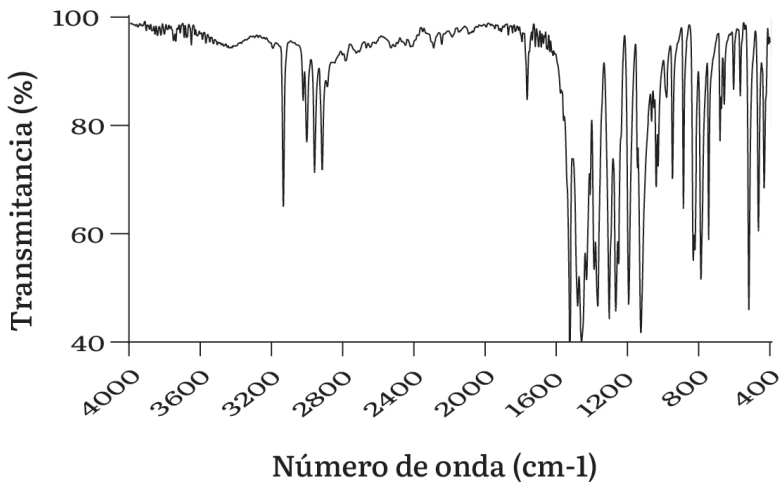


Figura 2.4.

Espectro infrarrojo del TND.



Por otra parte, los espectros infrarrojos, figuras 2.5. a 2.12, de los materiales obtenidos por activación física muestran numerosas bandas de adsorción, independientemente de las diferentes temperaturas de activación, que son similares a los del bagazo. Se evidencian bandas localizadas entre 3600 y 3200 cm^{-1} con una banda alrededor de 3300 cm^{-1} asociadas a la vibración de estiramiento O-H de los grupos hidroxilo unidos por enlaces de hidrógeno. Por otra parte, la aparición de la banda alrededor de 2900 cm^{-1} puede atribuirse a la vibración asimétrica de los grupos C-H. Las bandas entre 1800 y 1600 cm^{-1} se atribuyeron a la vibración de estiramiento C=C en el anillo aromático. Las bandas entre 1400 y 800 cm^{-1} se deben al estiramiento de grupos C-O. Por último, las bandas en 600 y 400 cm^{-1} pueden pertenecer a vibraciones de estiramiento C-C. Estos resultados muestran que los grupos funcionales obtenidos pudieron haberse formado debido a la degradación oxidativa por el tratamiento térmico (Somyanonthanakun et al., 2023).

Figura 2.5.

Espectro infrarrojo del carbonizado #1.

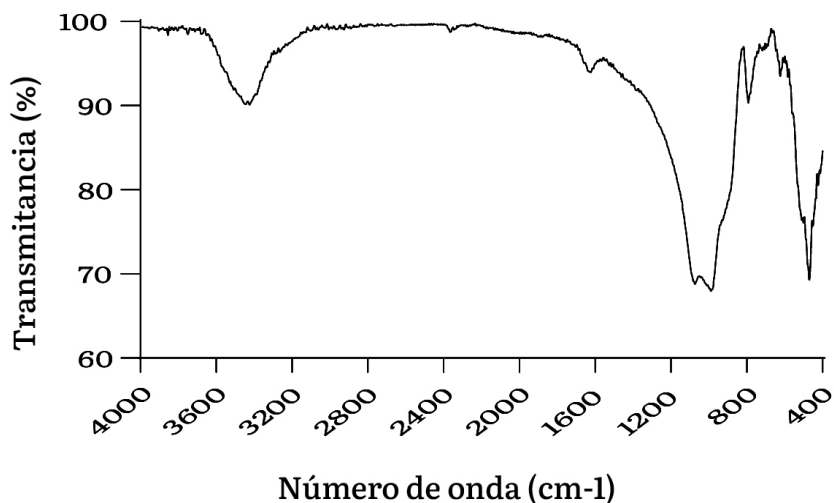


Figura 2.6.
Espectro infrarrojo del carbonizado #2.

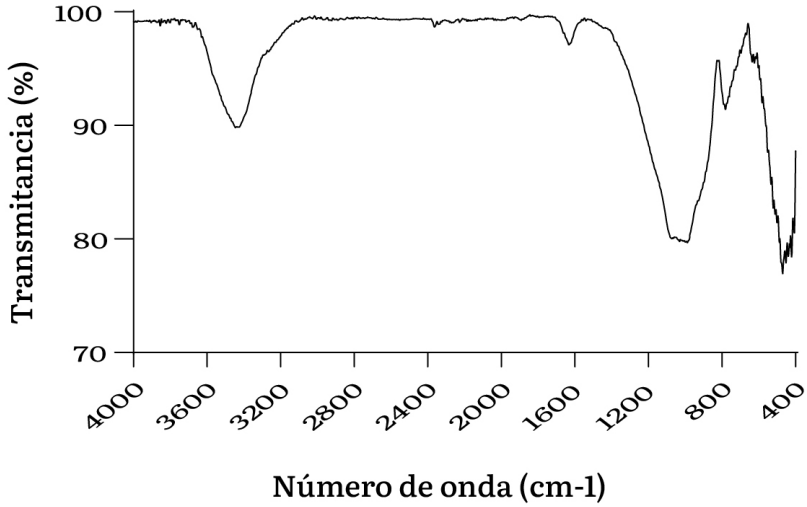


Figura 2.7.
Espectro infrarrojo del carbonizado #3.

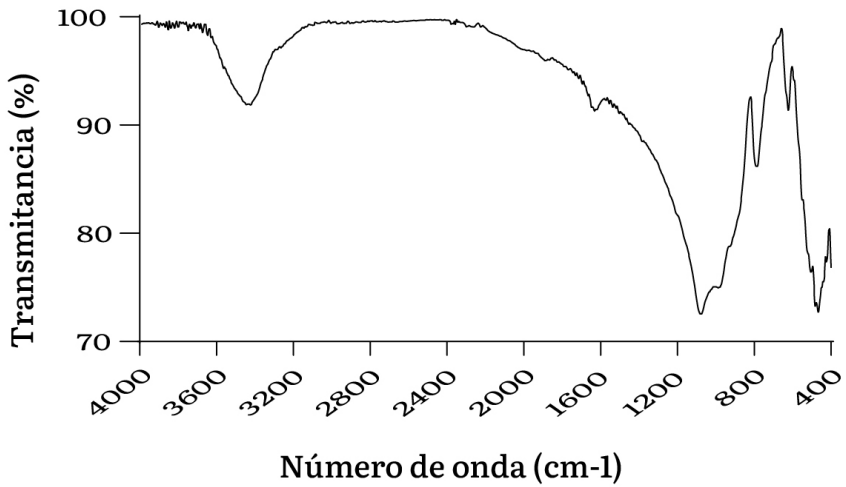


Figura 2.8.

Espectro infrarrojo del carbonizado #4.

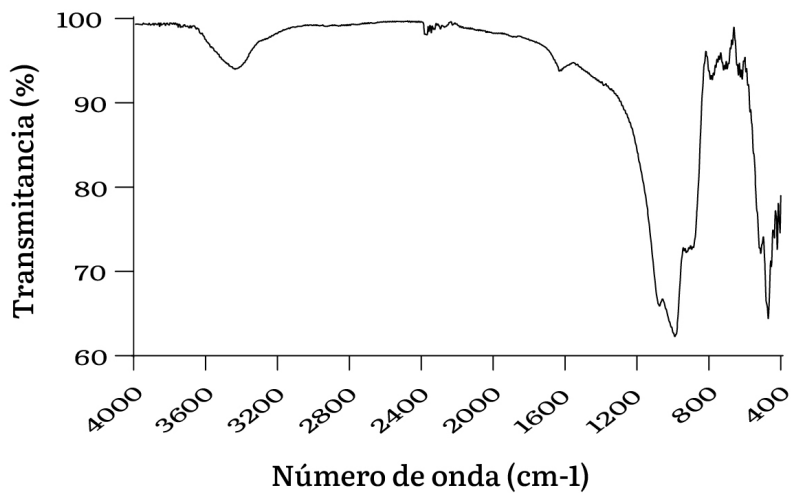


Figura 2.9.

Espectro infrarrojo del carbonizado #5.

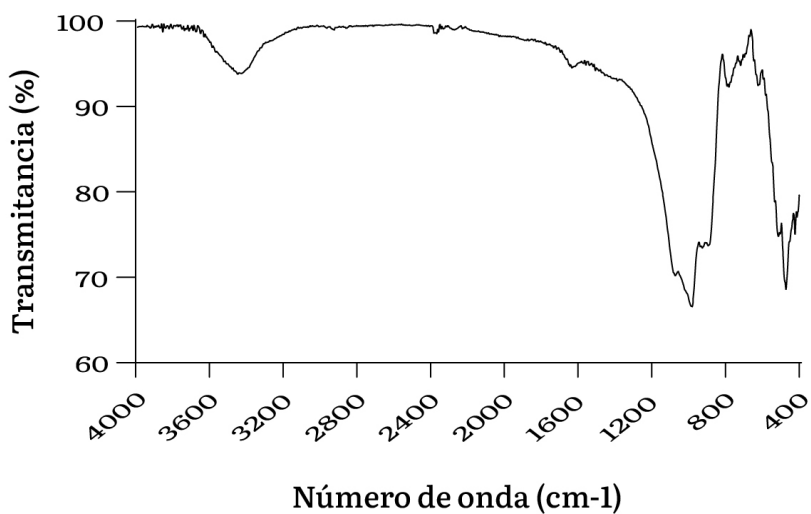


Figura 2.10.
Espectro infrarrojo del carbonizado #6.

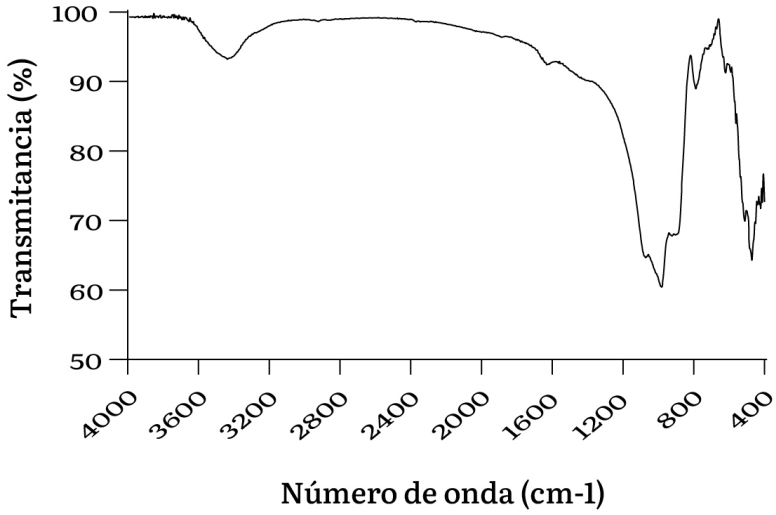


Figura 2.11.
Espectro infrarrojo del carbonizado #7.

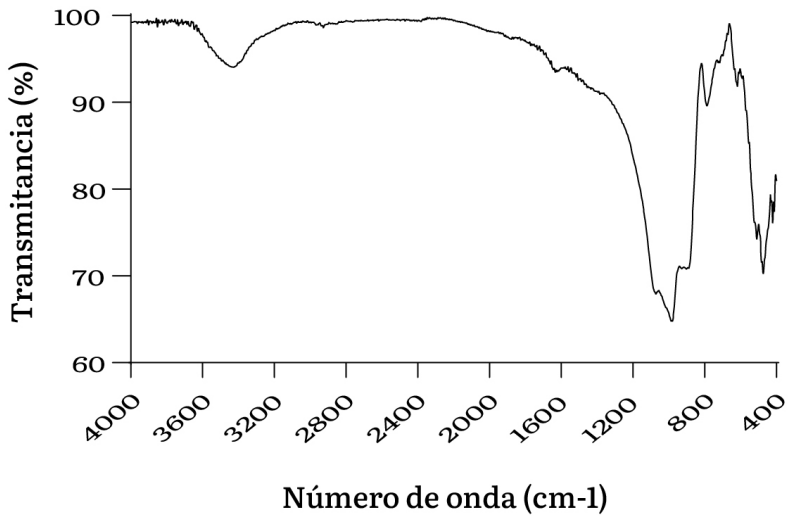
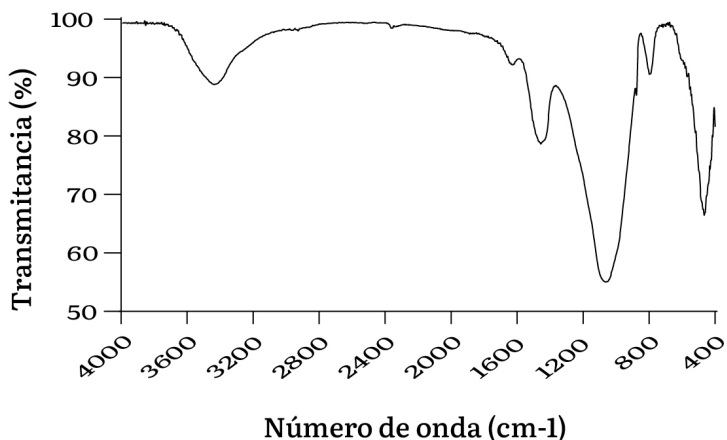


Figura 2.12.

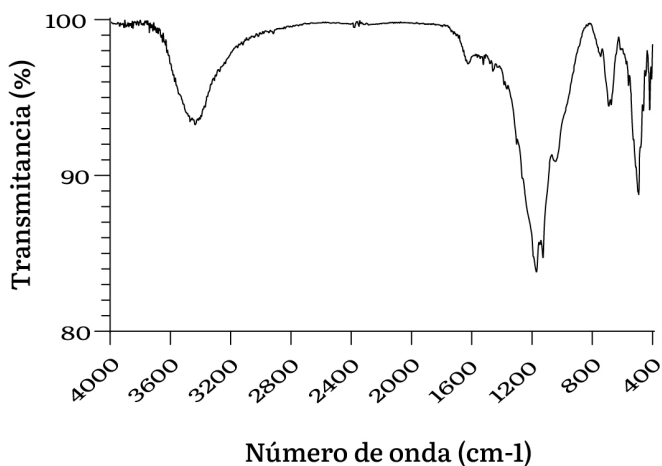
Espectro infrarrojo del carbonizado #8.



Además, el espectro infrarrojo en la figura 2.13 del material activado de forma química con ácido fosfórico presentó bandas entre 1100 y 1200cm-1 atribuibles a la flexión de los grupos P=O y P-O, indicando que la superficie del material fue efectivamente modificada (Mohtashami et al., 2018).

Figura 2.13.

Espectro infrarrojo del carbonizado #9.



Evaluación de la Capacidad Descontaminante de los Materiales Adsorbentes

La curva de calibración realizada presentó una ecuación de la recta de $y = 0.04x + 0.0376$ y un valor de $r^2 = 0.985$.

Los resultados de los estudios de remoción se presentan en la tabla 2.2. Se evidencia que el bagazo de caña por sí mismo tiene una capacidad de remoción del 19.8%, esto debido a interacciones por enlaces de hidrógeno que puede establecer entre el TND y los grupos OH de la estructura de celulosa, hemicelulosa y lignina. No obstante, con el tratamiento físico se evidenció una disminución en su capacidad adsorbente, ya que como se mencionó anteriormente, hay pérdida de la estructura de la celulosa, hemicelulosa y lignina lo que afecta negativamente su interacción con el TND.

Por otra parte, la activación química mejoró notablemente la capacidad de interacción con el TND. Esto se puede explicar por el hecho que el TND tiene un pKa de 4.7 (Patnala et al., 2017) y los ensayos se realizaron a un pH de alrededor de 5.5, con lo que el TND tiene una carga positiva en su grupo NO_2 , que puede interactuar a través de interacciones electrostáticas con los grupos fosfatos presente en la superficie de los materiales activados químicamente, con lo que se mejora su capacidad de retención de TND. No obstante, se evidencia que no hubo una correlación entre la temperatura de activación y el porcentaje de remoción de TND, lo cual podría indicar modificaciones diferentes en cuánto a grupos fosfatos en la superficie del material adsorbente, aunque algunos estudios de remoción empleando otros compuestos han demostrado que no hay una correlación entre el contenido de grupos fosfatos y el porcentaje de remoción. Además, es necesario tener presente que el área superficial de cada uno de los materiales adsorbentes juega un papel fundamental para la interacción con TND, ya que a una mayor área superficial hay mayor probabilidad de una mayor retención de este contaminante.

Tabla 2.2.

Resultados de remoción de TND por parte de los diferentes materiales adsorbentes.

# Carbonizado	Condiciones obtención materiales adsorbentes	Remoción tinidazol (%)
0	Bagazo	19.8 ± 3.1
1	1:30 h a 600 °C	2.8 ± 1.1
2	1:30 h a 750 °C	10.3 ± 1.7
3	1:30 h a 900 °C	10.7 ± 3.2
4	3 h a 600 °C	8.4 ± 2.6
5	5 h a 600 °C	5.1 ± 1.5
6	1:30 h a 600 °C	10.2 ± 1.3
7	3 h a 600 °C	13.7 ± 0.9
8	5 h a 600 °C	6.7 ± 0.9
9	3 h a 600 °C	78 ± 2.5
10	3 h a 750 °C	33.6 ± 1.3
11	3h a 900°C	7.9 ± 1.1

Análisis Microbiológico de Material Farmacéutico no Estéril

Los análisis de material farmacéutico no estéril dieron como resultado ausencia de bacterias patógenas, *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* en los tres materiales carbonizados activados de manera química, lo cual se atribuye a que estos materiales pasaron por un proceso de activación con ácido fosfórico lo que pudo conllevar a que se inhibiera su crecimiento. Estos análisis microbiológicos son primordiales en la industria farmacéutica para las materias primas de uso cotidiano, que es el objetivo final de la producción de este carbón activado. Estos resultados se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3.

Resultados de los análisis microbiológicos.

	Microorganismos	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
Bagazo de caña	Ausencia	Ausencia
Carbonizado #9	Ausencia	Ausencia
Carbonizado #10	Ausencia	Ausencia
Carbonizado #11	Ausencia	Ausencia

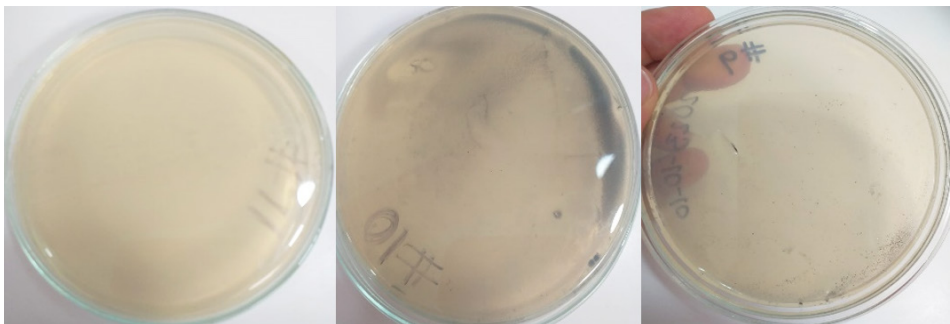
Determinación de *Pseudomonas Aeruginosa*

La *Pseudomonas aeruginosa* produce una amplia variedad de factores de virulencia, por lo tanto, la patogénesis de esta bacteria puede ser descrita como multifactorial. Puede colonizar partes del cuerpo humano, sin embargo, la prevalencia de esta colonización en personas saludables es baja. En su gran mayoría, las infecciones ocasionadas por *Pseudomonas aeruginosa* están relacionadas al ambiente hospitalario, constituyendo un grave problema clínico.

De acuerdo con los resultados presentes en la figura 2.14 se encontró que los materiales no tenían presencia de este microorganismo.

Figura 2.14.

Resultados de la detección de *Pseudomonas aeruginosa* en los materiales Carbonizados activados.



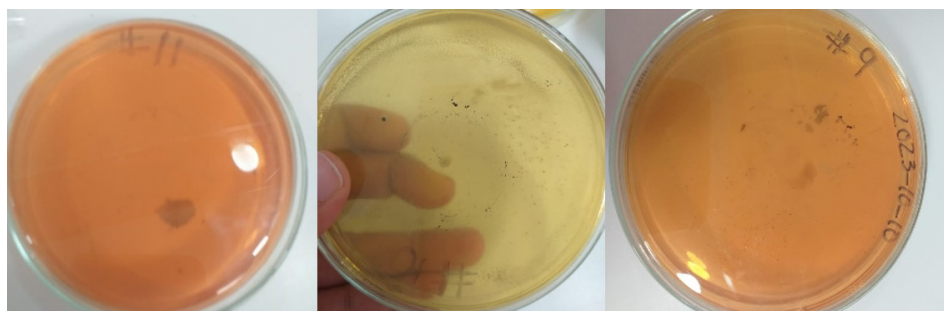
Determinación de *Staphylococcus Aureus*

Staphylococcus aureus es una bacteria considerada como oportunista, debido a que ocasiona enfermedades al humano, principalmente cuando éste atraviesa lapsos de vulnerabilidad asociados a circunstancias anómalas que disminuyen la competencia de su sistema inmunológico. Es una causa común de piodermitis, intoxicaciones alimentarias y toda una gran variedad de afecciones entre la población general (Taylor & Unakal, 2023).

De acuerdo con los resultados presentes en la figura 2.15 se encontró que los materiales no tenían presencia de este microorganismo.

Figura 2.15.

Resultados de la detección de *Staphylococcus aureus* en los materiales Carbonizados activados.



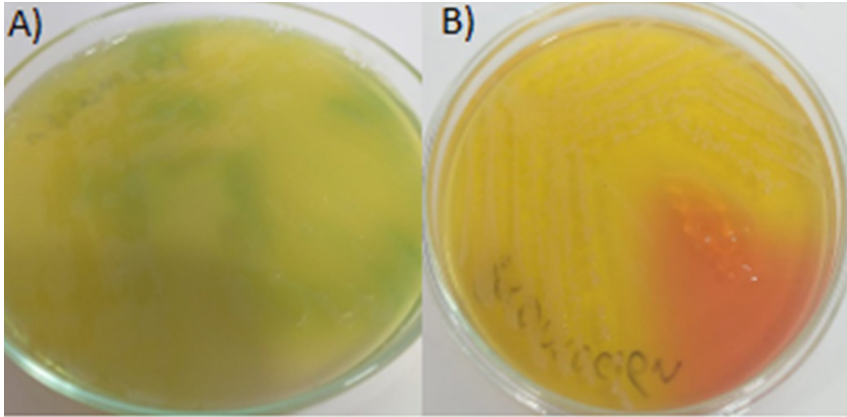
Prueba de Promoción de Crecimiento

La prueba de promoción de crecimiento para el agar Manitol y Cetrimida, fue positiva ya que hubo presencia crecimiento de colonias características para estos microorganismos. En el caso de *Pseudomonas aeruginosa* hubo crecimiento y pigmentación de verde azulada a verde característica alrededor del crecimiento de este microorganismo (Kiska & Gilligan, 2003) como se puede ver en la figura 2.16A, en tanto, para *Staphylococcus aureus* se evidenció que la placa presenta crecimiento y pigmentación de colonias amarillas rodeadas o no de un halo amarillo, característica del crecimiento de

este microorganismo (Taylor & Unakal, 2023), tal como se muestra en la figura 2.16B.

Figura 2.16.

Prueba de promoción de crecimiento. A) *Pseudomonas aeruginosa* en agar Cetrimida. B) *Staphylococcus aureus* en agar Manitol Salado.



Conclusiones

El bagazo de caña de azúcar demostró una capacidad de adsorción de Tinidazol en todos los ensayos realizados de manera física y química, sin embargo, el carbonizado activado de manera química con ácido fosfórico a una temperatura de 600 °C durante 3 horas removió el 78% del tinidazol presente en la muestra, un porcentaje alto que muestra su efectividad. Además, hay que considerar que el bagazo sin ningún tratamiento también demostró un porcentaje de remoción considerable de 19.8%, un resultado incluso mayor que algunos de los materiales activados de manera física.

El carbón activado producido a partir del bagazo de caña es un material que presentó un alto grado de efectividad al remover en este caso tinidazol, esto pudo ser producido por las características fisicoquímicas del material, los tiempos y temperaturas a las que se realizaron las activaciones e incluso el ácido fosfórico con el que se realizó su activación química.

Con este trabajo se puede concluir que el carbón activado producido a partir de desechos agroindustriales como el bagazo de caña para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con tinidazol es un gran avance en cuanto a temas de biorremediación, ya que se da un segundo uso a un desecho de la industria que no parecía tener un factor de aplicación en temas de descontaminación del medio ambiente. El desarrollo de este producto puede tener un impacto ambiental positivo para la descontaminación de cuerpos de agua contaminados con tinidazol y es de esperarse que otros materiales precursores para la producción de carbón activado funcionen de manera similar, logrando un aprovechamiento de desechos agroindustriales típicos de la zona y mitigando así los altos niveles de desperdicios.

Con lo anterior se abren las puertas al uso de diferentes materiales de desecho agroindustriales como posibles fuentes de descontaminación, se pueden generar alternativas de gran impacto ambiental que permitan realizar trabajos de biorremediación y explorar así otros ámbitos de aplicación. Además, se puede profundizar en diferentes metodologías para obtener así materiales carbonizados con otras características de acuerdo con los usos que se les puede dar como adsorbentes y mejorar así los resultados de remoción.

Referencias Bibliográficas

- Arcos, J.C. (2022). Remoción de productos farmacéuticos de aguas residuales mediante el uso de adsorbentes zeolíticos”. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c48b6ae2-d95c-4cbd-b369-6aa95ea98380/content>
- Asocaña. (2023). Sector Agroindustrial de la Caña. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215#:~:text=Durante%20el%202022%2C%20la%20agroindustria,partir%20de%20ca%C3%Bl%20de%20az%C3%BAcar>
- Bachrun, S., AyuRizka, N., Annisa, S., & Arif, H. (2016). Preparation and characterization of activated carbon from sugarcane

- bagasse by physical activation with CO₂ gas. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 105, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/105/1/012027>
- Cueva-Orjuela, J. C., Del Socorro Hormaza-Anaguano, A., & Merino-Restrepo, A. (2017). Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment. *DYNA*, 84(203), 291–297. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61723>
- Farmacopea de los Estados Unidos de América (2024). Capítulo 62. Examen microbiológico de productos no estériles: pruebas de microorganismos específicos.
- Hinojosa, Y. González, C., & Pérez LR (2021). Contaminantes emergentes en el agua: causas y efectos. *Impluvium*, 10(8), 21-26.
- Hiranobe, C. T., Gomes, A. S., Paiva, F. F. G., Tolosa, G. R., Paim, L. L., Dognani, G., Cardim, G. P., Cardim, H. P., Santos, R. J. D., & Cabrera, F. C. (2024). Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling. *Clean Technologies*, 6(2), 662–699. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020035>
- Kiska, D.L., and P.H. Gilligan. 2003. Pseudomonas. In: Murray, P. R., E. J. Baron, J.H. Jorgensen, M. A. Pfaller, and R. H. Tenover (ed.). *Manual of clinical microbiology* 8th edition. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 47(4), 625–626. [https://doi.org/10.1016/s0732-8893\(03\)00160-3](https://doi.org/10.1016/s0732-8893(03)00160-3)
- Kumar A, Singh Y, Chaudhary V, Bhardwaj N (2014). Characterization of Cellulose Nanocrystals Produced by Acid-Hydrolysis from Sugarcane Bagasse as Agro-Waste. *Journal of Materials Physics and Chemistry*, 2(1): 1-8. <https://doi.org/10.12691/jmpc-2-1-1>
- Kumar, A., Negi, Y. S., Choudhary, V., & Bhardwaj, N. K. (2020). Characterization of Cellulose Nanocrystals Produced by Acid-Hydrolysis from Sugarcane Bagasse as Agro-Waste. *Journal of Materials Physics and Chemistry*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.12691/jmpc-2-1-1>

- Mohtashami, S., Kolar, N. A., Kaghazchi, T., Asadi-Kesheh, R., & Soleimani, M. (2018). Optimization of sugarcane bagasse activation to achieve adsorbent with high affinity towards phenol. *TURKISH JOURNAL OF CHEMISTRY*, 42(6), 1720–1735. <https://doi.org/10.3906/kim-1806-71>
- Narayanasamy, S., Chan, K. L., Cai, H., Razak, A. H. B. A., Tay, B. K., & Miao, H. (2019). Biobutanol production from sugarcane bagasse by *Clostridium beijerinckii* strains. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67(5), 732–737. <https://doi.org/10.1002/bab.1865>
- Patnala, R. C. M., Khagga, M., Bhavani, R., & Bhavani, V. (2017). Synthesis, Characterization and Biological activity of Novel Salt/Molecular Salts of Tinidazole. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(2), 859–872. <https://doi.org/10.13005/ojc/330235>
- Primera-Pedrozo O, Colpas-Castillo F, Meza-Fuentes E, Fernández-Maestre R (2011). Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35 (136), 387-396.
- Qin, Q., Qin, H., Li, K., Tan, R., Liu, X., & Li, L. (2020). The adsorption characteristics and degradation mechanism of tinidazole on an anatase TiO₂ surface: a DFT study. *RSC Advances*, 10(4), 2104–2112. <https://doi.org/10.1039/c9ra06665a>
- Raut, E. R., Bedmohata, M. A., & Chaudhari, A. R. (2022). Comparative study of preparation and characterization of activated carbon obtained from sugarcane bagasse and rice husk by using H₃PO₄ and ZnCl₂. *Materials Today Proceedings*, 66, 1875–1884. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.413>
- Sohani, S., Ara, B., Khan, H., Gul, K., & Khan, M. (2022). RETRACTED: Photocatalytic assessed adsorptive removal of tinidazole from aqueous environment using reduced magnetic graphene oxide-bismuth oxychloride and its silver composite. *Environmental Research*, 215(Pt 2), 114262. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114262>

- Somyanonthanakun, W., Greszta, A., Roberts, A. J., & Thongmee, S. (2023). Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon as a Potential Material for Lead Ions Removal from Aqueous Solution and Supercapacitor Energy Storage Application. *Sustainability*, 15(6), 5566. <https://doi.org/10.3390/su15065566>
- Taylor, T. A., Tobin, E. H., & Unakal, C. G. (2025, December 1). *Staphylococcus aureus* Infection. StatPearls - NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441868/>
- Teng, H., Yeh, T., & Hsu, L. (1998). Preparation of activated carbon from bituminous coal with phosphoric acid activation. *Carbon*, 36(9), 1387-1395. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(98\)00127-4](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(98)00127-4)
- Vargas, Y.A., & Pérez, L.I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 1(1), 59-72.
- Vera, L., Uguña, M.F., García, N., Flores, M., & Vázquez, V. (2015). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Revista de Química Teórica y Aplicada*, 73(573), 43-49.
- Vidal, M., Rodríguez, A., Martínez, K., Ocampo, J., & Barrios, W. (2018). Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión. *Scientia Et Technica*, 23(3), 412-420.
- Wang, H., Wang, Y., & Dionysiou, D. D. (2023). Advanced oxidation processes for removal of emerging contaminants in water. *Water*, 15(3), 398. <https://doi.org/10.3390/w15030398>
- Yakout, S., & El-Deen, G. S. (2011). Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1155-S1162. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.12.002>

