

ACTIVACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE CENIZAS PRODUCIDAS EN INGENIOS AZUCAREROS DEL ESTADO DE VERACRUZ PARA SU CONVERSIÓN A MATERIALES ADSORBENTES

PHYSICAL- CHEMICAL ACTIVATION OF ASHES PRODUCED IN SUGAR MILL IN THE VERACRUZ STATE FOR THEIR CONVERSION TO ADSORBENT MATERIALS

Villalobos-Ramírez J ¹, Osorio-Mirón A ¹, Licona-Aguilar Á.I ², Díaz- Castellanos K ¹

¹Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas. Orizaba, Veracruz, México

²Departamento de Ingeniería Bioquímica, TecNM/IT de Celaya, Guanajuato, México.
angeleslicona88@gmail.com; aom_posgrado@hotmail.com

RESUMEN

Actualmente, uno de los problemas más alarmantes del mundo es el incremento de la contaminación ambiental, que perjudica a los recursos naturales (aire, suelo y agua). La mayoría de los impactos ambientales son provocados por las actividades humanas a consecuencia del crecimiento de la población y el desarrollo industrial. Sectores industriales específicamente en la producción de azúcar (Ingenio PANUCO SAPI de CV, Ingenio San Miguel), son de las principales actividades económicas en el estado de Veracruz, las cuales generan grandes cantidades de biomasa que en su mayoría no son aprovechadas, tales como el bagazo de caña de azúcar, hojas de caña, cenizas obtenidas durante la quema del bagazo de caña en la generación de energía eléctrica; etc. Estos residuos

pueden ser tratados químicamente para otorgarles un valor agregado. El presente trabajo tiene como objetivo el aprovechamiento de las cenizas para su conversión a materiales adsorbentes (carbón activado). Para su conversión, las cenizas fueron sometidas a activaciones físico-químicas, mediante la aplicación de agentes químicos (hidróxido de sodio NaOH - ácido fosfórico H_3PO_4) y temperatura a 500 °C. Se analizó sus propiedades respecto a la carga superficial, determinación de densidades y porosidad; así mismo, se determinaron los grupos químicos funcionales mediante el método BOEHM y por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR); además, de análisis para la determinación de carbono fijo, materia volátil, contenido de cenizas y humedad. Los resultados obtenidos mostraron un

material con variedad de grupos químicos (carbonilos, ácidos carboxílicos, metil, metileno, etc.). Se identificó el valor de pH apropiado a partir de la determinación del punto de carga cero, en el cual puede llevarse a cabo el intercambio catiónico; los valores de porosidad fueron incrementando al aplicar el tratamiento químico. Con los resultados obtenidos se puede concluir que el material de carbono es un buen candidato para futuras aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas.

Palabras clave: cenizas, carbono activado, adsorción, modificación química.

ABSTRACT

Currently one of the most alarming problems in the world is the increase in environmental pollution, which harms natural resources (air, soil and water). Most environmental impacts are caused by human activities as a result of population growth and industrial development. Industrial sectors specifically in the production of sugar (Ingenio PANUCO SAPI de CV, Ingenio San Miguel), are the main economic activities in the Veracruz state; which generate large amounts of biomass, that are mostly not used such as, sugarcane

bagasse, cane leave and fly ashes obtained during the burning of cane bagasse in the generation of electricity, etc. These residues can be chemically treated to give them added value. The present work aims to use the ashes for conversion to adsorbent materials (activated carbon). For its conversion, the ashes were subjected to physical-chemical activation, by applying chemical agents (sodium hydroxide NaOH - phosphoric acid H₃PO₄) and temperature at 500 °C. Properties regarding to surface charge, densities determination and porosity were analyzed; likewise, the functional chemical groups were determined by the the BOEHM method and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Furthermore, analysis for the determination of fixed carbon, volatile matter, ash content and moisture. The results obtained showed a material with a variety of chemical groups (carbonyls, carboxylic acid, methyl, methylene, etc.). The appropriate pH value was identified from the determination of the zero charge point; at which cation exchange can be carried out; the porosity values were increasing when applying the chemical treatment. Overall, with results obtained, it can be concluded that carbon

material is a good candidate for future applications in the treatment of contaminated water.

Keywords: ashes, activated carbon; adsorption; chemical modification.

INTRODUCCIÓN

El estado de Veracruz es el productor de azúcar más importante en el país; registrando un promedio de caña molida en todos los ingenios del estado durante la zafra 2021-2022 de aproximadamente 21 millones de toneladas de caña, para producir un aproximado de 2 millones de toneladas de azúcar [1] ; generando una considerable cantidad de bagazo, biomasa residual que resulta de la molienda de la caña de azúcar, que es actualmente usada en las calderas para la generación de energía eléctrica. Durante la calcinación de la biomasa se originan cenizas residuales que por acción de las corrientes de viento son distribuidas al entorno. **Figura1 (a) y (b).**



Figura 1. (a) Bagazo de caña de azúcar, (b) Cenizas residuales

Desafortunadamente, si no se da una disposición final adecuada de este residuo, puede crear efectos negativos para el ambiente provocando contaminación del agua y aire [2]; así mismo para la salud humana generando enfermedades respiratorias como cáncer de pulmón, complicaciones renales y tuberculosis debido principalmente al contenido de óxido de silicio o sílice [3].

Respecto a las cantidades, se estima que por cada tonelada de caña de azúcar procesada dentro del ingenio se generan 270 kg de bagazo, mientras que por cada tonelada de bagazo carbonizado en las calderas se obtiene 25 kg de ceniza residual [4] . Por otro lado, con relación a su composición química, la ceniza residual tiene una estructura química rica en óxidos y anhídridos (SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , K_2O , MgO , SO_3) [5]. Investigaciones recientes muestran que es posible el uso de las cenizas residuales para el aprovechamiento potencial de su composición química y estructural, específicamente para aplicaciones en tratamiento de agua contaminada [6] . El proceso de adsorción con el uso de residuos agroindustriales, es uno de los procesos más efectivos en el tratamiento de remoción de contaminantes. Para

hacer uso de los residuos en aplicaciones de remediación ambiental, es necesario realizar una modificación química con el objetivo de adicionar componentes como grupos oxigenados (alcoholes, fenoles, esteres, ácidos carboxílicos, etc.) considerados como sitios activos en el proceso de adsorción. Se emplean diversos agentes químicos tales como KOH, K₂CO₃, ZnCl₂, NaOH, H₃PO₄, etc. Además, la modificación química del material genera diferentes propiedades como alta área superficial, desarrollo en la porosidad con la formación de micro y meso poros, estabilidad térmica, que favorecen la capacidad de adsorción. El presente trabajo tiene como objetivo la modificación química de las cenizas residuales de los ingenios azucareros (Ingenio PANUCO SAPI de CV, Ingenio San Miguel), para su conversión a materiales adsorbentes para futuras aplicaciones en el tratamiento de efluentes industriales.

Para la modificación de las cenizas residuales se llevó a cabo una activación química empleando dos agentes activantes, hidróxido de sodio (NaOH) y ácido fosfórico (H₃PO₄), con la función principal de adicionar grupos químicos en la superficie de las cenizas, además de un

tratamiento térmico aplicando altas temperaturas para desarrollar porosidad en su superficie.

METODOLOGÍA

El residuo de cenizas fue donado por dos ingenios azucareros del estado de Veracruz (Ingenio PANUCO SAPI de CV, Ingenio San Miguel). Los reactivos empleados para la activación química fueron ácido fosfórico (H₃PO₄), Sigma Aldrich, pureza 85 %; hidróxido de sodio (NaOH), Fermont, pureza ≥95 % y agua destilada.

Activación química de las cenizas. Para llevar a cabo la activación química de las cenizas, se emplearon dos agentes activantes: hidróxido de sodio (NaOH) y ácido fosfórico (H₃PO₄), con el objetivo de estudiar los efectos químicos que provocan al material, respecto a la química superficial. Se inició con la activación con hidróxido de sodio a una concentración 5 M (**Figura 2**). Se colocó 20 g de ceniza en 40 mL de la solución, se mantuvo en agitación constante durante 3 horas a 100 °C. Posteriormente, la muestra se dejó en reposo a 80 °C por 12 h. Se realizó el mismo procedimiento para la activación química con ácido fosfórico (H₃PO₄) concentrado.

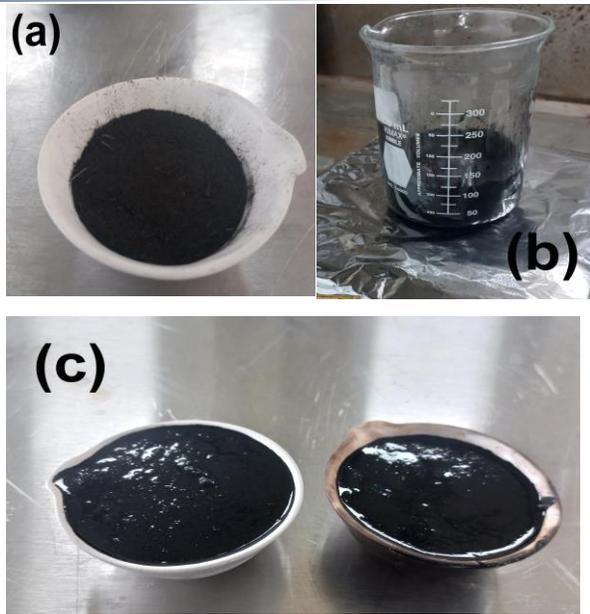


Figura 2. (a) Residuo de ceniza, (b) Activación química del residuo, (c) Cenizas modificadas químicamente con (NaOH) y (H₃PO₄).

Activación térmica de los materiales impregnados. La activación térmica de los materiales se llevó a cabo aplicando temperatura a 500 °C durante 90 minutos. Transcurrido el tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente para ser lavados con agua destilada a temperatura de 95 °C. Las muestras se secaron a 100 °C durante 24 horas para análisis posteriores.

Análisis proximal. Determinación de materia volátil. El análisis de la determinación de materia volátil, fue realizado con el objetivo de cuantificar los constituyentes de la biomasa que se degradan o desprenden de la materia al

aplicar altas temperaturas en el proceso térmico.

Para su determinación se realizó a lo establecido a la norma ASTM D3175-11. Primeramente, se pesó 1 g de cada muestra para calcinarla en una mufla a 850 °C durante 10 min. Transcurrido el tiempo, se llevó a enfriamiento a temperatura ambiente, la muestra se pesó y este valor es correspondiente a los compuestos no volátiles.

El porcentaje de la materia volátil fue determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Materia Volátil} = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde m_s corresponde a la masa de la muestra y m_{nv} presenta la masa de la materia no volátil.

Determinación de ceniza y carbono fijo.

Se determinó el porcentaje de residuos inorgánicos obtenidos antes y después del proceso de calcinación y activación de los materiales. Se realizó mediante la norma ASTM D3174-12. La muestra fue calcinada a 650 °C durante 4 horas; posteriormente se enfrió a temperatura ambiente y se tomó su peso.

El porcentaje de cenizas fue determinado por la ecuación.

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{m_{ce}}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Donde % *Ceniza* es el porcentaje de material inorgánico que queda después del proceso de calcinación y modificación química, m_{ce} es el peso del crisol más la muestra calcinada y m_s la masa de la muestra.

El porcentaje de carbono fijo es el carbono elemental presente en los materiales modificados químicamente, se determinó mediante la diferencia de la materia volátil y cenizas de la muestra total. Para el cálculo se aplicó la ecuación 3, basada en la norma ASTM D3172-13.

$$\% \text{ Carbono fijo} = \frac{m_{nv} - m_{ce}}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Determinación de pH. El valor de pH de los materiales activados químicamente puede variar debido a los grupos químicos que fueron generados por el efecto del agente activante. Para su determinación se llevó a cabo el siguiente procedimiento: se pesó 1 g del material y se puso en contacto con 100 mL de agua destilada; la muestra se mantuvo en agitación constante a temperatura de 90 °C durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo, la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente y se midió el valor de pH.

Determinación del punto de carga cero (PZC). Se llevó a cabo la determinación del valor de pH donde la carga superficial del material es nula; llevando a cabo el siguiente procedimiento, se colocó 25 mL de agua destilada a diferentes valores de pH (1-12), para la modificación se utilizó hidróxido de sodio (1M) y ácido clorhídrico (1M). Se adicionó 0.25 g de muestra y se sometió a agitación constante durante 24 horas, para posteriormente filtrar y medir el pH final. La relación entre los pH iniciales y finales se emplearon para obtener ΔpH a partir de la siguiente ecuación.

$$\Delta pH = pH_{inicial} - pH_{final} \quad (4)$$

Análisis de compuestos solubles en agua y ácido. Los materiales carbonáceos activados fueron sometidos a un análisis para comprobar su pureza respecto a las sustancias extraídas por las activaciones aplicadas (térmica y química). El procedimiento para la determinación de compuestos solubles consistió en pesar 1 g de cada material, el cual se transfirió a un vaso de precipitado para adicionar 100 mL de agua destilada y para el caso de la determinación de los compuestos solubles en ácido se usó 10 mL de ácido clorhídrico. Las muestras se mezclaron y se mantuvieron en agitación

durante 1 h a 90 °C. Después, se adicionó 20 mL de agua destilada y se filtró en un matraz Erlenmeyer de filtración, la muestra se lavó con 150 mL de agua destilada. El material filtrado se pesó y se transfirió a un matraz volumétrico de 50 mL y se enrasó. Posteriormente, se pesó un vaso de precipitado limpio y seco, donde se adicionó 25 mL de la muestra. Se dejó evaporar hasta peso constante a 80 °C.

Los contenidos de compuestos solubles en agua y en ácido se cuantificaron aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Solubles en agua} = \frac{A-Z}{m} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ Solubles en ácido} = \frac{B-Z}{m} \times 100 \quad (6)$$

Donde A es la masa del vaso más los solubles en agua (g), B corresponde a la masa del vaso más los solubles en ácido, Z es la masa del vaso vacío (g) y m masa de la muestra inicial (g).

Densidad real y aparente. Para la determinación de la densidad real se realizó usando un picnómetro, el cual se pesó vacío para luego adicionar una determinada cantidad de muestra y ser llenado con agua destilada hasta el enrase. Se registro el peso final y el valor

de la densidad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{real} = \frac{m \cdot \rho_L}{m + (P+L) - (P+m+L)} \quad (7)$$

Donde ρ_{real} es la densidad real de la muestra, m corresponde a la masa del material colocada dentro del picnómetro, ρ_L es la densidad del agua destilada a temperatura ambiente, $P+L$ corresponde al peso del picnómetro con agua y $P+m+L$ representa el peso del picnómetro con la masa de muestra y agua.

Se realizó la determinación de la densidad aparente mediante el método de la probeta, adicionando una cantidad 1 g de muestra a una probeta, se tomó lectura del volumen ocupado por la muestra y se prosiguió con el cálculo utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_{aparente} = \frac{m}{V_{aparente}} \quad (8)$$

Donde $\rho_{aparente}$ es la densidad aparente de la muestra, m corresponde a la masa del material, $V_{aparente}$ es el volumen ocupado por el material.

Determinación de porosidad. Con los datos obtenidos en la determinación de las densidades, se realizó el cálculo de la porosidad para todos los materiales antes y después del tratamiento químico; empleando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{real} - \rho_{aparente}}{\rho_{real}} * 100 \quad (9)$$

Cuantificación de grupos químicos (Método Boehm).

Para la determinación de grupos ácidos y básicos presentes en los materiales se realizó mediante titulación a lo establecido en el Método Boehm [7]. Se colocaron 0.25 g de cada muestra en 25 mL de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N, se mantuvieron en agitación constante durante 24 horas; transcurrido el tiempo, las muestras se filtraron y se extrajo 10 mL del filtrado para añadir 5 gotas de indicador y llevar a cabo la titulación de la solución, empleando como agente titulante hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N. Se realizó el mismo procedimiento para la cuantificación de los grupos básicos, la muestra se colocó en 25 mL de hidróxido de sodio y se tituló con ácido clorhídrico 0.1 N.

Los moles ácidos y básicos fueron cuantificados por las siguientes ecuaciones:

$$\text{moles ácidos} = \frac{V_b * C_b - [V_{eqHCl} * C_{HCl} \left(\frac{V_b}{V_{alícuotaNaOH}} \right)]}{m} \quad (10)$$

Donde *moles ácidos* corresponde a la cantidad de moles de los grupos funcionales ácidos en la superficie del carbón, V_b es el volumen de la base que fue sometida a agitación con el material, m

es la masa del material, C_b es la concentración de V_b , C_{HCl} es la concentración del agente titulante, $V_{alícuotaNaOH}$ es el volumen de la alícuota que reaccionará con el agente titulante y V_{eqHCl} es el volumen de ácido en el que ocurre el punto de equivalencia de la titulación.

moles básicos =

$$\frac{V_a * C_a - [V_{eqNaOH} * C_{NaOH} \left(\frac{V_a}{V_{alícuotaHCl}} \right)]}{m} \quad (11)$$

Los *moles básicos* son la cantidad de moles de grupos funcionales básicos ubicados en la superficie del material, V_a es el volumen de ácido que fue mezclado con la masa del material (m), C_a es la concentración de V_a , C_{NaOH} es la concentración del agente titulante, $V_{alícuotaHCl}$ es el volumen extraído tras finalizar la agitación y V_{eqNaOH} es el volumen de base con el que ocurre el punto de equivalencia.

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier.

Se realizó la identificación de los grupos químicos, las muestras fueron analizadas en polvo por reflectancia total atenuada (ATR) en un espectrómetro marca Perkin Elmer, Spectrum One, en un intervalo de 4000 a 500 cm^{-1} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Contenido de ceniza y carbono fijo. En la siguiente **Figura 3a**, se muestra el contenido de ceniza de cada uno de los materiales, el objetivo de los tratamientos realizados al material es la reducción de minerales para obtener un material con mayor contenido de carbono. En la determinación de ceniza, es posible observar que al ser activada químicamente con ácido fosfórico (H_3PO_4), su contenido disminuye hasta un 15% comparado a la materia prima. Para el caso de la activación con hidróxido de sodio, no fue posible la disminución de este contenido, existiendo una diferencia del 21% entre ambos tratamientos químicos.

En la determinación del carbono fijo, evidentemente el carbono activado obtenido a partir de la modificación química con ácido fosfórico (**Figura 3b**) mostró mayor contenido de carbono fijo en comparación con el carbono modificado con hidróxido de sodio; el ácido fosfórico es comúnmente utilizado en la activación de carbonos, debido principalmente al desarrollo de porosidad que genera en el material y a la degradación de compuestos orgánicos, generando materiales ricos en carbono [8].

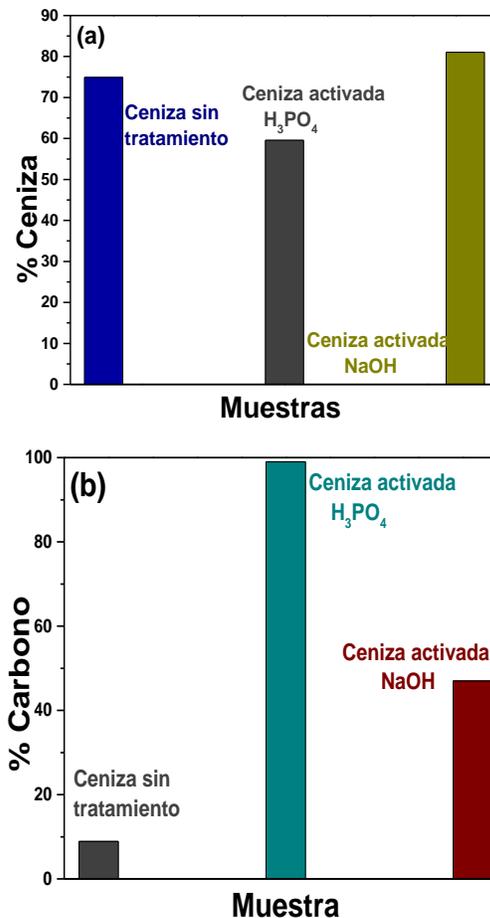


Figura 3. (a) Contenido de ceniza, (b) Contenido de carbono fijo después del proceso de activación.

Cuantificación de materia volátil. Los resultados obtenidos de la determinación de materia volátil son mostrados en la **Figura 4**. La ceniza sin tratamiento mostró un 17% aproximadamente de materia que se degradó durante el proceso de calcinación; para el caso de los carbonos modificados el material activado con ácido fosfórico mostró un mayor porcentaje del 30 % de componentes degradados a 500 °C, seguido del tratamiento con hidróxido de sodio con 26% de materia volátil.

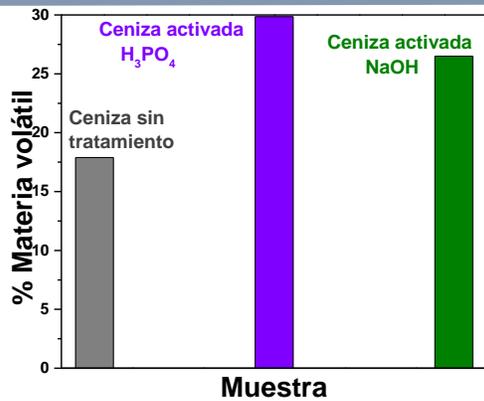


Figura 4. Contenido de materia volátil.

La Figura 5 muestra la relación existente entre el contenido de cenizas y el contenido de remoción de materia volátil para la generación de un material rico en carbono. En este caso, la modificación con ácido fosfórico con concentración 85% peso y temperatura de activación de 500 °C bajo atmósfera inerte, fueron las condiciones óptimas, para la conversión de la ceniza a un material rico en carbono.

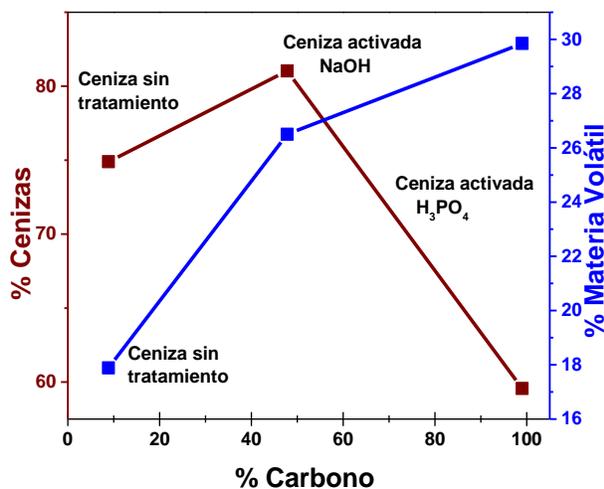


Figura 5. Relación del contenido de cenizas y materia volátil respecto al contenido de carbono.

Determinación de pH. El valor de pH de los materiales activados es un factor de interés en el proceso de remoción de contaminantes [9]; por otro lado, las propiedades de textura, área superficial, grupos químicos que son característicos de los carbonos activados, no son los únicos responsables de la capacidad de adsorción, el valor de pH en la superficie de los materiales carbonáceos es de gran importancia debido a que otorga la carga superficial, de esta manera si un material adsorbente tiene carga negativa otorgada a pH bajo, tendrá mayor afinidad a la atracción de cationes; y aquellos materiales con carga positiva generada a pH altos para aniones [10] [11]. La Tabla 1, muestra los valores de pH que presentan los materiales obtenidos, presentando valores altos y bajos de pH, estos valores pueden ser modificados en el proceso de adsorción, con el objetivo de buscar una carga negativa en la superficie del material, para atraer los contaminantes de carga positiva.

Tabla 1. Valores de pH de los materiales activados.

Muestra	Valor de pH
Ceniza	8
Ceniza H ₃ PO ₄	4
Ceniza NaOH	10

Punto de carga cero. Los resultados obtenidos son mostrados en la **Figura 6**, donde se observa el valor de pH asignado a la carga nula en la superficie del material. Para la ceniza activada con ácido fosfórico se aprecia que a un valor de pH 2 la carga del material es nula; para el caso de la ceniza sin tratamiento se observa una intersección entre pH 7 y 8, mientras que para la ceniza activada con hidróxido de sodio el valor oscila entre valores de pH 10 y 11 teniendo más tendencia hacia este último.

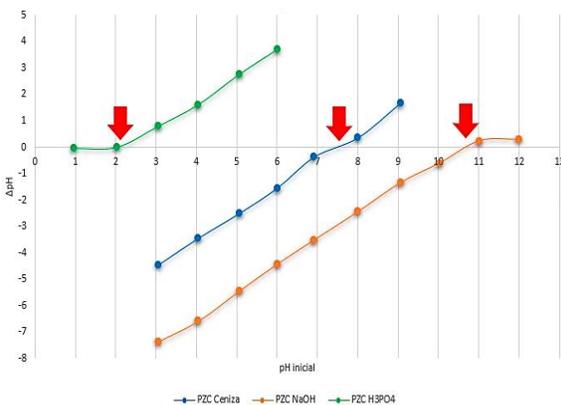


Figura 6. Determinación del punto isoeléctrico.

Lo cual indica que para el proceso de adsorción los valores de pH deben encontrarse por debajo del punto isoeléctrico para las cenizas activadas con hidróxido de sodio y para el material activado con ácido fosfórico el valor de pH debe ser superior al punto de carga cero. El valor de pH durante el proceso de remoción depende

del material a remover, de esta manera durante el proceso de remoción se puede considerar la modificación de los valores de pH, para lograr remover cationes o aniones según sea el caso.

Análisis de compuestos solubles en agua y ácido. La **Tabla 2**, muestra el porcentaje del contenido de solubles en agua y ácido para los materiales modificados con los diferentes agentes químicos.

Se observa para el material de carbono modificado con H₃PO₄, valores menores de 22.94% y 14.86% en el contenido de solubles en agua y ácido respectivamente y para el material modificado con NaOH, se muestran valores más altos de 52.07 % y 89.39% para solubles en agua y ácido. La disminución de solubles para la muestra Ceniza-H₃PO₄, se atribuye principalmente a la oxidación que genera el agente activante disminuyendo los extractables en el material, lo cual favorece su aplicación en el proceso de adsorción, debido a la mínima cantidad de compuestos solubles que pueden interferir en el proceso; por otra parte, los valores bajos de solubles nos indican mayor pureza en los materiales obtenidos mediante activaciones químicas [12].

Tabla 2. Porcentajes de los compuestos solubles en agua y ácido de cada material.

Muestra	Solubles en agua	Solubles en ácido
Ceniza H ₃ PO ₄	22.94%	14.86%
Ceniza NaOH	52.07%	89.39%

Determinación de densidades y porosidad. Los resultados obtenidos mediante la determinación de densidades y porosidad mostraron para las cenizas modificadas con H₃PO₄ un incremento en la porosidad en comparación a las cenizas modificadas con NaOH, ambos materiales satisfacen de manera ideal este factor y generan un aumento en la porosidad de aproximadamente 17% respecto a las cenizas sin tratamiento.

El incremento de la porosidad nos indica que la superficie del material fue modificada por los agentes químicos lo cual conlleva a la formación de variedad de tamaños de poros en la superficie del material, generando mayor área superficial [13]. **Tabla 3.**

Tabla 3. Valores de densidades y porosidad

Muestra de cenizas sin tratamiento y activadas	S/Tratamiento	C-NaOH	C-H ₃ PO ₄
ρ_{reat}	0.975 g/mL	1.714 g/mL	1.741 g/mL
$\rho_{aparente}$	0.454 g/mL	0.5 g/mL	0.5 g/mL
Porosidad	53.43%	70.82%	71.28%

Cuantificación de grupos químicos por el Método BOEHM. La cuantificación de los grupos químicos es mostrada en la **Tabla 4**, donde se observa que para las cenizas activadas con hidróxido de sodio se tiene un 57.28% de moles básicos y 42.71% de moles ácidos, predominando un carácter básico en la superficie del material, este porcentaje es confirmado mediante la técnica del punto isoelectrico, donde se obtuvo un valor de 10.74.

En el caso de las cenizas activadas con ácido fosfórico se determinó que la concentración de moles ácidos es de 84.64% y para los moles básicos 15.35%, estos datos confirman el carácter ácido de las cenizas, el cual se reportó con un valor de punto isoelectrico de 2.04.

Tabla 4. Determinación de grupos ácido y básicos

Parámetro	Cenizas	
	Activadas con NaOH	Activadas con H ₃ PO ₄
moles ácidos	4.6875 mequiv-g/g	7.65 mequiv-g/g
moles básicos	6.2875 mequiv-g/g	1.3875 mequiv-g/g

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier. La identificación de los grupos químicos presentes en el material antes y después de los tratamientos se realizó mediante espectroscopia infrarroja (**Figura 7**) donde se identificaron algunas señales para la

ceniza sin tratamiento debido a que no contiene variedad de grupos químicos en su superficie, de los grupos identificados y que se conservan en ambos tratamientos químicos fueron los grupos a 970, 1000 y 1014 cm^{-1} correspondientes a vibraciones de C-O. Las muestras modificadas químicamente mostraron nuevas señales iniciando a 3222 cm^{-1} para el tratamiento con hidróxido de sodio asignados a vibraciones de grupos hidroxilos – OH, seguido de la señal a 2928 cm^{-1} atribuida a estiramientos de grupos alifáticos CH; así mismo, fueron identificados en mayor intensidad grupos carbonilos en las bandas 1416 cm^{-1} y 1637 cm^{-1} . Con este análisis se confirma la aparición de nuevos grupos funcionales en la superficie de los materiales después del tratamiento químico, los cuales son de gran importancia debido a su contribución en la capacidad de retención de diversos contaminantes [14].

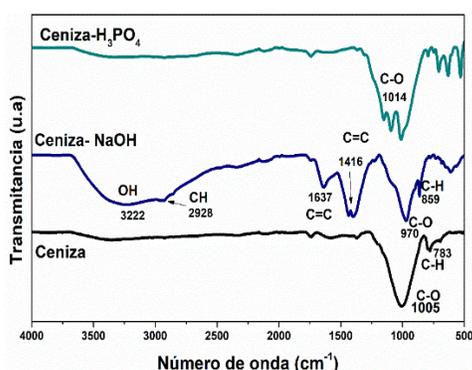


Figura 7. Espectro infrarrojo de los materiales antes y después de la activación físico-química.

CONCLUSIONES

El residuo de ceniza fue materia prima para la obtención de materiales adsorbentes de carbono. Se estableció el proceso de modificación química bajo parámetros de activación física y química, empleando dos agentes activantes (NaOH y H_3PO_4) a temperatura de 500 $^{\circ}\text{C}$, mostrando mejores resultados para los materiales activados con ácido fosfórico al 85% peso, respecto a su composición química y propiedades físicas; logrando obtener un 99% de carbono fijo y desarrollo de porosidad del 71.28%. En el análisis de química superficial los materiales mostraron en su mayoría grupos químicos como carbonilos, ácidos carboxílicos, grupos OH, los cuales le confieren la capacidad de adsorción. Del análisis de carga superficial, se determinó el punto de carga cero para cada material, donde se considera que los materiales obtenidos pueden ser modificados respecto a sus valores de pH para su futura aplicación en remoción de contaminantes, de esta manera la superficie de los materiales puede estar protonada con afinidad a especies como iones metálicos. Con este estudio, se concluye que la producción de materiales químicamente modificados a partir de

residuos generados por la industria azucarera son materiales prometedores para aplicaciones de remediación ambiental en la eliminación de contaminantes presentes en agua.

REFERENCIAS

- [1] M. Á. Cisneros López, «Evaluación económica con opciones reales: biorefinería de etanol combustible de segunda generación en Veracruz, México.,» 2016.
- [2] J. L. Reyes Montiel, «"La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.",» *Academic OneFile*, vol. 30, nº 2, p. 14, 2003.
- [3] Vikrant Goswami, Sharma Deepika, Swati Diwakar, David Kothamasi,, «Arbuscular mycorrhizas amplify the risk of heavy metal transfer to human food chain from fly ash ameliorated agricultural soils.,» *Environmental Pollution*, vol. 329, nº 121733, 2023.
- [4] Pérez, O. F. A., Varela, K. A. D., & Mena, J. D. C., «Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.*, 2022.
- [5] Yixi Tian, Nickolas J. Themelis, A.C.(Thanos) Bourtsalas, Shiho Kawashima, Yuri Gorokhovich,, «Systematic study of the formation and chemical/mineral composition of waste-to-energy (WTE) fly ash.,» *Materials Chemistry and Physics.*, vol. 293, nº 126849, 2023.
- [6] Chang Lei, Tao Chen, Qin-Yi Zhang, Lai-Shou Long, Zhou Chen, Zhi-Ping Fu,, «Remediation of lead polluted soil by active silicate material prepared from coal fly ash,» *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 206, nº 111409, 2020.
- [7] Ilicia M. Oickle, Sarah L. Goertzen, Katelyn R. Hopper, Yasmin O. Abdalla, Heather A. Andreas,, «tandardization of the Boehm titration: Part II. Method of agitation, effect of filtering and dilute titrant,» *Carbon*, vol. 48, nº 12, pp. 3313-3322, 2010.
- [8] Ibsa Neme, Girma Gonfa, Chandran Masi,, «Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review,» *Heliyon*, vol. 8, nº 12, p. e11940, 2022.
- [9] P. P. S. W. F. W. M. A. A. K. A. Y. A. S. Ika Yanti, «Effectiveness of activated carbon magnetic composite from banana peel (*Musa acuminata*) for recovering iron metal ions.,» *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.*, vol. 8, nº 100378., 2023.
- [10] Edward Gomez-Delgado, Gisel Nunell, Ana Lea Cukierman, Pablo Bonelli,, «Agroindustrial waste conversion into ultramicroporous activated carbons for greenhouse

- gases adsorption-based processes,» *Bioresource Technology Reports*, vol. 18, nº 101008,, 2022.
- [11] Á.I. Licona-Aguilar, A.M. Torres-Huerta, M.A. Domínguez-Crespo, D. Palma-Ramírez, E. Conde-Barajas, M.X.L. Negrete-Rodríguez, A.E. Rodríguez-Salazar, D.S. García-Zaleta, «Reutilization of waste biomass from sugarcane bagasse and orange peel to obtain carbon foams: Applications in the metal ions removal,» *Science of The Total Environment*, vol. 831, nº 154883, 2022.
- [12] Hernández Rodríguez, M., «Extracción de níquel (II) del licor ácido residual (WL) con carbón activado de conchas de coco químicamente modificado,» Tesis Doctoral, 2015.
- [13] Basso, M., Cerrella, E. G., & Cukierman, A. L., «Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados obtenidos de un precursor renovable.,» *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 5., vol. 5, 2001.
- [14] Suzimara Rovani, Amanda G. Rodrigues, Leonardo F. Medeiros, Renato Cataluña, Éder C. Lima, Andreia N. Fernandes,, «Synthesis and characterisation of activated carbon from agroindustrial waste—Preliminary study of 17 β -estradiol removal from aqueous solution,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, nº 2, pp. 2128-2137,, 2016.
- [15] T. V. N. M. C. M. V. R. G. K. R. K. Jagadeep, «Effective utilization of agricultural ashes in development of sustainable geopolymer concrete,» *Materials Today: Proceedings*,, 2023.

