

Evaluación técnica de la capacidad de adsorción del char de cáscara y semilla de aguacate a escala laboratorio

Technical evaluation of the adsorption capacity of avocado peel and seed char at a laboratory scale

Lourdes María Betzabé BERREONDO-LÓPEZ¹ & Luis Ernesto NÚÑEZ-GONZÁLEZ^{1,*}

¹ Centro de Procesos Industriales y Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala

*Correspondence: Luis Ernesto Núñez-González (lenunez@uvg.edu.gt)

Recibido: 23/IX/ 2024; Aceptado: 18/VI/2025

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en relación con la capacidad de adsorción del char de residuos de aguacate, ante contaminantes farmacológicos de agua clasificados como emergentes. El aprovechamiento de los residuos de aguacate para generar el adsorbente estudiado y la generación de conocimiento que lleve a propuestas para tratar aguas residuales con contaminantes de acetaminofén y diclofenaco de sodio de forma sostenible generaron la necesidad de este estudio. Para esto, se utilizaron métodos de molienda, análisis granulométrico, activación de char por medio ácido y pruebas adsorptivas en base al modelo de adsorción de Freundlich. Se obtuvo del tratamiento ácido de activación, una distribución de tamaño de char según la norma Tyler de 150-600 μm con una porosidad 6.2 μm significativamente mayor al realizar el tratamiento ácido en las muestras de CR-060 determinada a partir de microscopía electrónica de barrido. Con ello, se elaboraron las isothermas de adsorción de Freundlich del char empleado como adsorbente para determinar los parámetros del fenómeno, que indicaron una mayor capacidad de adsorción de acetaminofén en comparación al diclofenaco de sodio, e implican una influencia marcada de la estructura y el tamaño de partícula en la capacidad de adsorción. Esto abre un campo de estudio para posibles desarrollos de equipos o dispositivos que puedan emplearse en el tratamiento de aguas contaminadas con fármacos de diferentes tipos.

Palabras clave: adsorción, char, compuestos emergentes, tratamiento de agua.

Abstract: This paper presents the results obtained regarding the adsorption capacity of avocado waste-derived char for pharmacological water contaminants classified as emerging pollutants. The use of avocado waste to produce the studied adsorbent, along with the generation of knowledge aimed at developing sustainable treatment of wastewater containing acetaminophen and diclofenac sodium contaminants, gave rise to the need for this study. For this purpose, milling methods, particle size analysis, acid activation of the char, and adsorptive tests based on the Freundlich adsorption model were used. The acid activation treatment yielded a char size distribution from 150-to 600 μm according to the Tyler standard, with a significantly greater porosity of 6.2 μm in the acid-treated CR-060 samples, as determined by scanning electron microscopy. Based on this, Freundlich adsorption isotherms were developed for the char used as an adsorbent to determine the parameters of the phenomenon, which indicated a greater adsorption capacity for acetaminophen compared to diclofenac sodium, highlighting a marked influence of particle size and structure on the adsorption capacity. This opens up a field of study for the possible development of equipment or devices that can be used in the treatment of water contaminated with different types of pharmaceuticals.

Keywords: adsorption, char, emerging compounds, water treatment.

INTRODUCCIÓN

La contaminación hídrica es un problema global que pone en riesgo tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos (Barceló & López 2007). Si bien se reconocen ampliamente las fuentes tradicionales de contaminación como las actividades domésticas, agrícolas e industriales, un desafío creciente es la presencia de contaminantes emergentes en el agua. Estos contaminantes, que incluyen productos farmacéuticos, agentes tensoactivos, plastificantes y otros compuestos industriales, han comenzado a detectarse en concentraciones que, aunque bajas, tienen el potencial de causar efectos adversos significativos en el medio ambiente y la salud pública. La principal fuente de estos agentes es la actividad humana, especialmente a través de aguas residuales urbanas (Gil *et al.* 2012).

El tratamiento convencional de aguas residuales no está diseñado para eliminar estos contaminantes emergentes, lo que agrava el problema. Diversas investigaciones han explorado tecnologías avanzadas como biorreactores de membrana (Gil *et al.* 2012), ósmosis inversa (Barceló & López 2007) y oxidación avanzada (Gil *et al.* 2012), pero su implementación requiere inversiones significativas, lo que limita su adopción generalizada. En este contexto, se ha destacado el uso del char (carbonilla o residuo carbonoso) de pirólisis, un material adsorbente que ha demostrado eficacia en la mitigación de contaminantes emergentes (Martínez Fierro 2012). Sin embargo, existen lagunas en el conocimiento respecto a la capacidad de adsorción del char de pirólisis proveniente de la cáscara y semilla de aguacate (Kennedy & Murthy 2011).

Ante este contexto, este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación técnica y exploratoria para caracterizar las propiedades adsorbentes del char de aguacate, determinando su efectividad en la adsorción de diferentes compuestos emergentes. Los resultados obtenidos esclarecen su potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la mitigación de la contaminación hídrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del char. La obtención de char a partir de residuos de aguacate, específicamente cáscaras y semillas, se llevó a cabo mediante un proceso de pirólisis. Primero, los residuos fueron recolectados, lavados y secados para eliminar impurezas y humedad. Luego, se trituraron hasta obtener un tamaño de partícula uniforme. El material triturado se colocó en un reactor de pirólisis bajo una atmósfera inerte (con nitrógeno) para evitar la combustión. El proceso se realizó a una temperatura controlada, entre 400 y 600°C, durante un tiempo determinado para garantizar la descomposición térmica. Durante la pirólisis, los compuestos volátiles se liberaron, y el material carbonoso restante fue el char, que se enfrió lentamente dentro del reactor

antes de su recolección para su posterior caracterización y uso en la adsorción de contaminantes (Leite *et al.* 2017; Digheero Valenzuela 2023).

Acondicionamiento del char. Para acondicionar el char obtenido mediante pirólisis, se emplearon diversos equipo: un molino de discos, una balanza semianalítica y una tamizadora ROTAP. El acondicionamiento comenzó pesando el char en la balanza semianalítica. Posteriormente, se conectó y encendió el molino de discos, al cual se alimentó con el material carbonizado. Una vez molido, el char fue recolectado en una bolsa plástica colocada en la descarga del molino. Después del proceso de molienda, se pesaron los tamices de la tamizadora y se procedió a alimentar esta con 100 g de char molido. La tamizadora operó durante 15 min, tras lo cual se retiraron los tamices y se pesó la cantidad de char retenido en cada uno. Para garantizar uniformidad en el tamizado, se repitió el proceso con cada fracción obtenida, organizando el producto final en frascos rotulados según el tamaño de partícula. Los datos obtenidos fueron tabulados, y se realizó un análisis granulométrico para describir las características del char. Esto se basó en la metodología descrita por Huang *et al.* (2009).

Activación del char. La activación del char se llevó a cabo utilizando diversos reactivos y equipos. Se pesaron 15 g de char tamizado y se mezclaron con 30 mL de ácido sulfúrico al 40%, permitiendo que la mezcla reposara durante 24 horas. Pasado este tiempo, el contenido fue trasladado a un crisol y calentado en una mufla a 550°C durante 30 minutos. Después de enfriar el material, se añadió 30 mL de hidróxido de sodio al 0.1N y se agitó con una varilla para asegurar la completa absorción de la solución por el char. Finalmente, la muestra fue llevada a un horno durante 3 horas a 105° C. Una vez completado este proceso, el char activado se almacenó en recipientes rotulados para su posterior análisis. Esto se basó en la metodología descrita por Suzuki (1994).

Caracterización del char. Se cuantificó el efecto de la activación ácida sobre el char. Para esto se realizó un análisis granulométrico en el que seleccionó evaluar el char retenido por el mesh No. 60 (al cual se le denominó CR-060) de la norma Tyler como material adsorbente. A partir de esto, la muestra se activó químicamente con el procedimiento descrito anteriormente. Se enviaron muestras de 5 g de char sin activar y 5 g de char activado al Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, ubicado en la Ciudad de Guatemala, para la realización de una microscopía electrónica de barrido (SEM) y una prueba de caracterización de sólidos. Estos análisis permitieron determinar el tamaño promedio de los poros en cada muestra y a partir de la población de tamaños de poro obtenidos para el material activado y sin activar, se realizó una prueba t de Student al 95%, para determinar el nivel de significancia del cambio de tamaño promedio de poro empleando el software Minitab®.

Formulación de soluciones. Partiendo de los diferentes contaminantes reportados por Barceló & López (2007) y su potencial para ser tratados por adsorción, se seleccionó el enfoque en fármacos comunes. Específicamente acetaminofén y diclofenaco de sodio fueron estudiado con la elaboración de las isotermas de adsorción de Freundlich de acuerdo con lo realizado por Bathia & Myers (2006). Por lo que, se trituraron tabletas comerciales de ambos fármacos utilizando un mortero hasta obtener un polvo fino. Luego, se prepararon 100 mL de una solución madre de 80 ppm de cada compuesto utilizando agua destilada. Se prepararon 50 mL de soluciones a distintas concentraciones (0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 ppm) de cada compuesto. Posteriormente, se determinaron las curvas de calibración para cada especie en un espectrofotómetro UV-Vis, utilizando longitudes de onda de 242 nm para el acetaminofén y 276 nm para el diclofenaco (ver Leite *et al.* 2017).

Isotermas de adsorción. El procedimiento, para la elaboración de isotermas de adsorción involucró la adición de 0.0075 g de char en un matraz, junto con 50 mL de una solución de 10 ppm del compuesto a adsorber. La mezcla fue sometida a agitación constante a 310 rpm durante el tiempo óptimo de adsorción determinado previamente. Tras este período, se tomó una muestra de 3 mL, que fue centrifugada durante 15 min antes de leer la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis para determinar la concentración de la solución. Este procedimiento se repitió para soluciones con concentraciones de 15, 20, 25, 30 y 35 ppm. Finalmente, se construyó una isoterma de adsorción y se determinaron los parámetros correspondientes

según el modelo de Freundlich (ver Bhatia & Myers 2006; Treybal 2007):

$$q = K \times C^{\frac{1}{n}}$$

donde q es la cantidad de soluto adsorbido en la fase sólida por unidad de masa del adsorbente (generalmente en mg/g o g/kg); C es la concentración del soluto en la fase líquida en equilibrio (generalmente en mg/L o g/L); K es la constante de Freundlich, que representa la capacidad de adsorción del adsorbente; y, n es el exponente de Freundlich, que refleja la intensidad de adsorción y varía con la naturaleza del adsorbato y el adsorbente.

RESULTADOS

Activación química del char. Figura 1 presenta una toma de microscopía de barrido electrónico en la cual se evidencia cómo la activación química del char aumentó el tamaño del poro de la muestra. El valor medio del tamaño del poro del char con activación química fue significativamente (prueba t de Student: $p < 0.05$) mayor ($35.13 \pm 8.73 \mu\text{m}$) que el sin activación ($28.93 \pm 6.24 \mu\text{m}$).

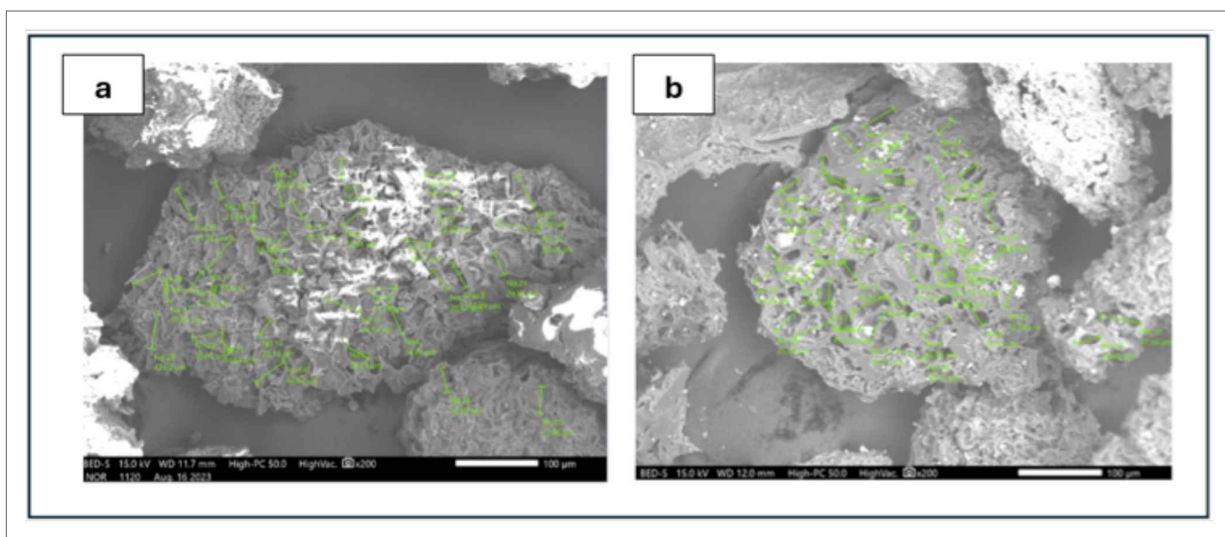


Figura 1. Tamaño de poro de la muestra CR-060 sin activación química (a) y tamaño de poro con activación química (b). Foto de microscopía electrónica obtenida en el Laboratorio de Cementos Progreso, Universidad del Valle de Guatemala.

Figure 1. Pore size of sample CR-060 without chemical activation (a) and pore size with chemical activation (b). Scanning electron microscopy image obtained at the Cementos Progreso Laboratory, Universidad del Valle de Guatemala.

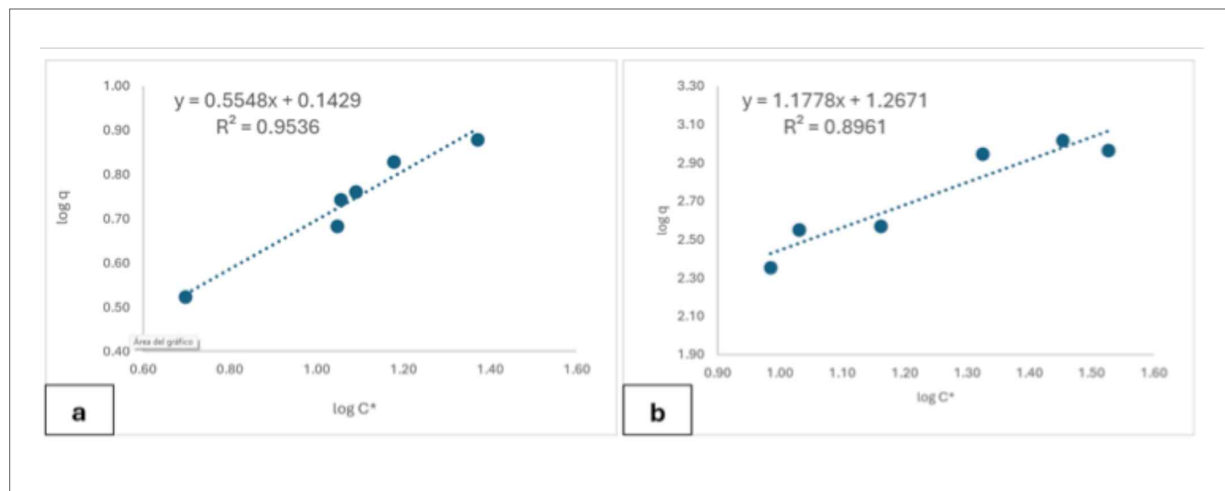


Figura 2. Isothermas de adsorción en solución de acetaminofén comercial (a) y diclofenaco de sodio comercial (b) a concentración de 10 ppm a 35 ppm a 25°C. Se grafica el logaritmo de base 10 de la concentración del fármaco en mg/L en el eje X y el logaritmo de base 10 de la cantidad de soluto adsorbido en la fase sólida por unidad de masa del adsorbente en mg/g en el eje Y.

Figure 2. Adsorption isotherms in commercial acetaminophen solution (a) and commercial sodium diclofenac (b) at concentrations from 10 ppm to 35 ppm at 25°C. The base-10 logarithm of the drug concentration in mg/L is plotted on the X-axis and the base-10 logarithm of the amount of solute adsorbed onto the solid phase per unit mass of the adsorbent in mg/g is plotted on the Y-axis.

Se evidencia con las mediciones acotadas y con el tamaño de poros de forma cualitativa que la microscopía electrónica muestra el efecto de incremento del tamaño de poro en la superficie del char utilizado proveniente de la reacción de pirólisis de residuos de aguacate (ver Fig. 1). La forma y características superficiales son comunes a lo reportado por Martínez Fierro (2012).

Además, el char activado con ácido mostró mejor capacidad para adsorber contaminantes con 40% m/m extra de capacidad másica en comparación con el material sin activación. El mismo material mostró de 20% a 35% más efectividad en la adsorción de contaminantes que otros carbones activados con mayor tamaño de partícula, razón por la que el uso del CR-060 es preferida sobre otros tamaños de partícula posibles.

Adsorción de contaminantes emergentes en char químicamente activado. Figura 2 muestra comparativamente las gráficas y ecuaciones de las isothermas de Freundlich obtenidas para la adsorción de acetaminofén y diclofenaco de sodio, donde se observa una mayor pendiente e intercepto para el diclofenaco de sodio con las mismas condiciones y char CR-060 activado como adsorbente.

A partir de las isothermas de Freundlich, se obtuvo los siguientes valores de la constante K y exponente n de Freundlich para el acetaminofén empleando la Ecuación 1: K de 1.390 ± 0.062 y n de 1.802 ± 0.013 (Fig. 2a). Para el diclofenaco de sodio se obtuvo valores de K de 18.50 ± 0.59 y n de 0.8490 ± 0.0453 (Fig. 2b). Estos resultados muestran que el adsorbente tiene una mayor afinidad al acetaminofén que al diclofenaco de sodio.

DISCUSIÓN

El presente estudio se realizó considerando lo reportado por Suzuki (1994) y Dighero Valenzuela (2023), donde se evidencia que la estructura y su composición físico-química le confieren el potencial de ser eficaz como adsorbente, sobre todo, dado que el proceso de pirólisis genera un material con una estructura porosa, lo que aumenta el área superficial del char y genera una superficie químicamente activa, que permite la interacción entre adsorbente y soluto (Martínez Fierro 2012).

Dentro de la variedad de distintos contaminantes emergentes orgánicos en aguas residuales, los compuestos farmacéuticos son considerados los principales agentes contaminantes incluso a bajas concentraciones porque muchos fármacos son resistentes a la biodegradación lo que les permite permanecer en el agua durante largos periodos de tiempo. Además los analgésicos y antiinflamatorios son tóxicos para los organismos acuáticos ya que causan problemas hepáticos y renales en su sistema inmunológico (Barceló & López 2007). Dado que los tratamientos de aguas residuales no están diseñados específicamente para eliminar contaminantes farmacéuticos, se optó por estudiar la adsorción con char de materiales residuales (en este caso char de residuos de aguacate) para brindar un punto de partida que potencialmente permita el aprovechamiento residual y la reducción de contaminantes en cuerpos acuíferos.

El tratamiento químico aplicado al char proviente de la pirólisis de residuos de aguacate mostró que la activación fue eficaz en la creación de una red de poros (Fig. 1). Esto coincide con

lo reportado por Martínez Fierro (2012), que indica un aumento del área superficial de las muestras de carbón al activarse con la técnica química empleada, generando una mayor capacidad de adsorción con las moléculas de las especies químicas afines al char. Considerando el aumento significativo del tamaño de poro promedio de 6.2 μm con el tratamiento aplicado y el efecto cualitativo observado (Fig. 1) se concluye que el proceso empleado es eficaz en la generación de poros.

Una mayor área superficial ofrece más sitios activos para la adsorción de moléculas de fármacos, permitiendo la captura eficiente de compuestos en pequeñas concentraciones (Neimark & Ravicovitch 2001). Además de esto, el char suele contener una red de microporos (poros menores de 2 nm) y mesoporos (poros de 2 a 50 nm) que favorecen la adsorción de moléculas pequeñas, como los fármacos. Los microporos son especialmente eficaces para atrapar moléculas de bajo peso molecular, mientras que los mesoporos pueden adsorber fármacos de mayor tamaño. La combinación de diferentes tamaños de poros facilita la adsorción de una amplia variedad de contaminantes (Leite *et al.* 2017).

Al evaluar las isothermas de Freundlich del char en solución de acetaminofén de acuerdo con los conceptos mencionado por Treybal (2007), se encontró que el parámetro de capacidad de adsorción K fue mayor a 1 y el valor de intensidad de adsorción (n) fue de 1.802 ± 0.013 (Fig. 2a). Esto sugiere que el proceso de adsorción del acetaminofén no es lineal y que el adsorbente tiene una fuerte afinidad por este compuesto. Además, el valor de n superior a 1 indica que la adsorción es favorable en concentraciones bajas. Por otro lado, para el diclofenaco de sodio (Fig. 2b) se obtuvieron valores de capacidad de adsorción K mayores al acetaminofén e intensidades de adsorción menores a 1, lo que indicó que la adsorción del diclofenaco de sodio es menos favorable en comparación con el acetaminofén y que la afinidad del adsorbente es menor en este caso (ver Treybal 2007). Por lo tanto, se concluye que la selectividad y efectividad del adsorbente depende del compuesto adsorbido, y a partir de los parámetros de la ecuación de Freundlich se ofrece información crucial para diseñar sistemas de tratamiento de aguas que tengan en cuenta las diferencias en la adsorción de contaminantes farmacéuticos. A partir de estos resultados, en futuras investigaciones se podrían identificar estrategias específicas de maximización para la eliminación efectiva de acetaminofén y diclofenaco de sodio en aplicaciones de tratamiento de agua, u optar por analizar la dependencia de otros contaminantes emergentes y char de otros orígenes.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios previos, como los de Terzyk (2004a,b) y Leite *et al.* (2017), que destacan la influencia de la estructura y el tamaño de partícula en la capacidad de adsorción del carbón activado. Al igual que en estos estudios, el char activado con ácido mostró mejor capacidad para adsorber contaminantes lo que respalda la importancia de optimizar estos parámetros (ver Terzyk 2004a).

Estos resultados son relevantes frente a la problemática de la contaminación del agua en Guatemala según INSIVUMEH (2023), que expresa claramente la necesidad de materiales de adsorción más eficaces para tratar contaminantes emergentes en aguas residuales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso por su valiosa colaboración en la realización de los análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), fundamentales para la caracterización del material estudiado. Asimismo, se agradece al Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala por el suministro de insumos y apoyo técnico brindado durante las fases experimentales de esta investigación. Su contribución fue clave para el desarrollo riguroso y exitoso de esta investigación.

REFERENCIAS

- Barceló, L. D. & López de Alda, M. J. (2007). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC, Barcelona, España.
- Bhatia, S. K. & Myers, A. L. (2006). Optimum conditions for adsorptive storage. *Langmuir* 22(4): 1688-1700. <https://doi.org/10.1021/la0523816>
- Dighero Valenzuela, R. (2023). *Pirólisis de residuos de aguacate para la obtención de combustibles sólido y líquido*. Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala.
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I. & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia* 7(2): 52-73.
- Huang, Y., Hu, S., Zuo, S., Xu, Z., Han, C. & Shen, J. (2009). Mesoporous carbon materials prepared from carbohydrates with a metal chloride template. *Journal of Materials Chemistry* 19: 7759-7764. <https://doi.org/10.1039/B911011A>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH). (2023). Índices de Contaminación (ICOS). Marzo del 2023. [<https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2023/04/Informe-ICOS-Marzo-2023.pdf>]. Accesado: 12 de junio de 2025.
- Kennedy, J. & Murthy, Z. (2011). Activated carbons: classifications, properties and applications. [https://www.researchgate.net/publication/285933645_Activated_carbons_Classifications_properties_and_applications]. Accesado: 12 de junio de 2025.
- Leite, A. B., Saucier, C., Lima, E. C., dos Reis, G. S., Umpierrez, C. S., Mello, B. L., Shirmardi, M., Dias, S. L. P. & Sampaio, C. H. (2017). Activated carbons from avocado seed: optimisation and application for removal of several emerging organic compounds. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 7647-7661. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1105-9>

- Martínez Fierro, M. C. (2012). *Preparación y caracterización de carbón activo a partir de lignina para su aplicación en procesos de descontaminación de aguas*. Tesis doctoral, Departamento de Química Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Neimark, A. V. & Ravicovitch, P. I. (2001). Capillary condensation in MMS and pore structure characterization. *Microporous and Mesoporous Materials* 44-45: 697. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(01\)00251-7](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(01)00251-7)
- Suzuki, M. (1994). Activated carbon fiber: Fundamentals and applications. *Carbon* 32(4): 577-586. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0008-6223(94)90075-2)
- Terzyk, A. P. (2004a). Molecular properties and intermolecular forces - factors balancing the effect of carbon surface chemistry in adsorption of organics from dilute aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* 275(1): 9-29. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.011>
- Terzyk, A. P. (2004b). The effect of carbon surface chemical composition on the adsorption of acetanilide. *Journal of Colloid and Interface Science* 272(1): 59-75. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.015>
- Treybal, R. E. (2007). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill, New York, EE.UU.