


Remoción de colorantes en agua residual con carbón magnético activado

Removal of dyes in wastewater with activated magnetic charcoal

K. A. González-Ayala ^a, C. Camacho-López ^a, Y. Jaguey-Hernández ^{b,c}, E. P. Castañeda-Ovando ^d

A. Castañeda-Ovando ^{a,*}

^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Francisco I. Madero, Hidalgo, México.

^c Área Académica de Nutrición, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

^d Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El carbón activado (CA) obtenido de subproductos agroindustriales, así como sus variantes, han sido una alternativa económica para la remoción de compuestos orgánicos. El objetivo de este trabajo fue obtener un carbón magnético activado (CMA) a partir de bagazo de cebada (BSG) para utilizarlo en la remoción de colorantes sintéticos alimentarios presentes en agua residual doméstica. El CMA se sintetizó partiendo de BSG húmedo, el cual se trató térmicamente y se le adicionó magnetita (Fe_3O_4) para mejorar la separación. Se realizaron ensayos de remoción en columna y en modo dispersivo. En todos los casos se utilizaron colorantes en concentraciones individuales de 150 mg/L, la mezcla de éstos se adicionó a una muestra de agua residual doméstica y su remoción se evaluó en modo dispersivo. Se obtuvieron porcentajes de remoción >85% en ambos modos, lo que permite proponer el BSG como un subproducto que se puede aprovechar para obtener CA con propiedades adsorbentes de colorantes utilizados en la industria de alimentos.

Palabras Clave: Carbón magnético activado, bagazo de cebada, colorantes, adsorción.

Abstract

Activated charcoal (AC) obtained from agro-industrial by-products, as well as its variants, have been an economical alternative for the removal of organic compounds. The aim of this work was to obtain an activated magnetic charcoal (AMC) from brewers' spent grain (BSG) to be used in the removal of synthetic food dyes present in domestic wastewater. The AMC was synthesized from wet BSG, which was heat-treated and magnetite (Fe_3O_4) was added to improve separation. Removal tests were performed in column and dispersive mode. In all cases, dyes were used in individual concentrations of 150 mg/L, the mixture of dyes was added to a sample of domestic wastewater and their removal was evaluated in dispersive mode. Removal percentages >85% were obtained in both modes, which allows BSG to be proposed as a by-product that can be used to obtain CAs with adsorbent properties of dyes used in the food industry.

Keywords: Magnetic activated charcoal, brewers' spent grain, dyes, adsorption.

1. Introducción

Una gran cantidad de colorantes son descargados continuamente al medio ambiente, por medio de efluentes de agua residual provenientes de diferentes sectores de la industria, como la textil, papelera, de alimentos, entre otros. (Khoshmanesh et al., 2024). Se ha reportado que anualmente, se producen cerca de 70 millones de toneladas de colorantes sintéticos y tan solo la industria textil ocupa cerca de 10,000 toneladas (Dutta et al., 2024).

La presencia de colorantes en agua natural se ha asociado con diversos problemas ambientales (Benmaamar et al., 2019). Estos compuestos impiden el paso de la luz, afectando directamente al proceso de fotosíntesis en plantas acuáticas y con ello, una disminución en la concentración de oxígeno disuelto (DO) (Al-Tohamy, et al., 2022). Además, debido a su compleja estructura se han considerado como recalcitrantes, de difícil biodegradación y aumentan la demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), así como los niveles de carbono orgánico total (COT) en agua (Dehingia et al.,

*Autor para la correspondencia: ovandoa@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: go356705@uaeh.edu.mx (Karla Alejandra González-Ayala), cesar_camacho@uaeh.edu.mx (César Camacho-López), yari_jaguey@uaeh.edu.mx (Yari Jaguey-Hernández), profe_288@uaeh.edu.mx (Evodio Pedro Castañeda-Ovando), ovandoa@uaeh.edu.mx (Araceli Castañeda-Ovando).

Historial del manuscrito: recibido el 26/04/2024, última versión-revisada recibida el 16/08/2024, aceptado el 29/08/2024, en línea (postprint) desde el 23/09/2024, publicado el 05/07/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13i25.12890>



2024; Sivaranjane et al., 2024). Incluso, la exposición del ser humano a los colorantes sintéticos se ha asociado con problemas graves de salud, entre los que se incluyen cambios fisiológicos y neuroconductuales (Ramamurthy et al., 2024).

Diversas tecnologías han sido estudiadas en el tratamiento de colorantes en agua, tal es el caso de los procesos biológicos aerobios y anaerobios, coagulación, oxidación avanzada, así como la adsorción en carbón activado, entre otros (Buenaño et al., 2024). No obstante, no han sido eficientes para la eliminación de este tipo de compuestos orgánicos.

Por otro lado, el carbón activado (CA) es sintetizado a partir de la carbonización de un material con alto contenido de carbono orgánico y es caracterizado por poseer altas propiedades de adsorción, debido a su estructura microporosa y gran área superficial, así como estabilidad térmica y química (Jiang et al., 2019). La mayoría de los carbones activados son derivados de materiales lignocelulósicos y en los últimos años, se han obtenido CA a partir de desechos agroindustriales. Esto ha tenido gran relevancia en la valorización de estos desechos y su uso en tratamiento de agua residual debido a su bajo costo y accesibilidad (Ahmed et al., 2024).

El CA ha sido utilizado en el tratamiento de aguas residuales, para la purificación de gases, en extracción de compuestos químicos y la remoción de algunos otros (Jia et al., 2022). A pesar de lo anterior, se ha demostrado que, durante su aplicación en procesos de tratamiento de agua residual, se dificulta su separación de la fase acuosa. Por ello, adicionar un material magnético al carbón, es una alternativa para facilitar su separación. Además, conferir propiedades magnéticas, permite mejorar su capacidad de adsorción de compuestos inorgánicos y orgánicos iónicos como los colorantes en agua residual (Zhang et al., 2015). Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo consistió en evaluar la remoción de colorantes en agua mediante un carbón magnético activado obtenido a partir de bagazo de cebada, con la adición de magnetita para mejorar la separación.

2. Metodología

2.1. Síntesis de carbón magnético activado

La magnetita (Fe_3O_4) se sintetizó mediante el método de coprecipitación. Para ello, se mezclaron volúmenes iguales (50 mL) de disoluciones de Fe^{2+} ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y Fe^{3+} ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a una concentración de 0.7 M cada una. La mezcla se ajustó a pH 12, el cual se mantuvo con NaOH (6 M). La reacción se realizó a 50°C con agitación constante a 800 rpm por 2 h. El sólido se separó por filtración, se lavó 3 veces con agua desionizada y se calcinó a 330°C . El sólido se molió en un mortero de ágata y se almacenó en un vial de vidrio con cierre hermético.

Para la síntesis del carbón se tomaron 56 g de bagazo de cebada provenientes de una empresa cervecera del estado de Hidalgo. Estos se mezclaron con 2.80 g de K_2CO_3 y 2.83 g de Fe_3O_4 . La mezcla resultante se mantuvo a una temperatura de 110°C durante 24 h. Posteriormente, se precalcinó a 300°C por 1 h. Por último, y con la finalidad de activar el carbón resultante, la mezcla se mantuvo a 650°C en una mufla durante 3 h.

2.2. Caracterización del CMA

La morfología del CMA se evaluó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio electrónico de barrido Vega©Tescan en alto vacío. Para ello, se colocó una muestra del CMA en polvo en una cinta de doble cara en el portamuestras del equipo. Las micrografías se obtuvieron a 10 kV.

2.3. Ensayos de adsorción de colorantes en sistema en columna

Para realizar el ensayo, se empaquetaron columnas de 20 mL con 1 g de CMA. En cada una de ellas se hizo pasar en tres ocasiones (ciclos de extracción) 10 mL de una disolución que contenía una mezcla de colorantes sintéticos rojos (3, 4, 5 y 6) a 150 mg/L, cuyas estructuras químicas y nombres comunes se muestran en la Figura 3, con un tiempo de contacto de 30 min. Cada ensayo se realizó por triplicado.

2.4. Ensayos de adsorción de colorantes en sistema dispersivo

Se obtuvo una muestra de agua residual doméstica proveniente de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México. Para asegurar la presencia de los compuestos de interés, a esta agua se le adicionó una mezcla de los colorantes sintéticos rojo (3, 4, 5 y 6), azul (1 y 2) y negro brillante (150 mg/L cada uno). Los nombres comunes de los colorantes utilizados son: eritrosina (rojo 3), Ponceau SX (rojo 4), rojo allura (rojo 5), litol-rubina-BK (rojo 6), azul brillante (azul 1), carmín de índigo (azul 2) y negro (combinación de los colorantes rojos, azules y amarillos [tartrazina y amarillo anaranjado]), los cuales en su mayoría forman parte del grupo de los colorantes azoicos.

Los ensayos en el sistema dispersivo se realizaron en botellas serológicas de 60 mL. En cada botella se colocaron 20 mL de la disolución de colorantes sintéticos en agua residual doméstica y 1 g de CMA. Las botellas se mantuvieron en agitación a 150 rpm durante 30 min. Se aplicaron 3 ciclos al agua residual agregando 20 mL de la disolución de agua residual con colorantes. Para realizar la separación del CMA y del agua residual, se aplicó un campo magnético externo con la ayuda de un imán de neodimio.

La remoción de los colorantes se evaluó mediante medidas de absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis Genesys 10S (Thermo Scientific) a 507 (rojo) y 628 nm (mezcla).

2.5. Eficiencia de adsorción

La eficiencia de adsorción se evaluó mediante el porcentaje de remoción (%R) de los colorantes, el cual se calculó con la Ecuación 1.

$$\%R = \left(\frac{C_0 - C_i}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde, C_0 es la concentración inicial (mg/L) y C_i corresponde a la concentración al finalizar los ciclos (mg/L).

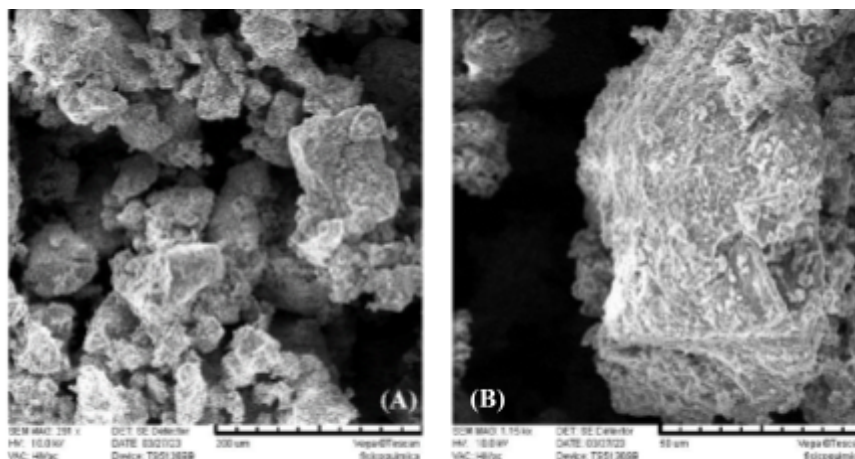


Figura 1: Micrografías del carbón activado magnético a 291 y 1.15 kx.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de carbón activado

Las micrografías del CMA muestran la presencia de partículas amorfas con bordes redondeados y superficie porosa (Figura 1). Adicionalmente, se muestra la formación de morfologías tendientes a lo esférico, las cuales pueden ser atribuidas a la hidrólisis de compuestos poliméricos presentes en el bagazo y formadas por reacciones de aromatización y deshidratación (Sivaranjane et al., 2024).

3.2. Remoción en columna

Los porcentajes de remoción de colorantes rojos (eritrosina, Ponceau SX, rojo allura y litol-rubina-BK) disueltos en agua se muestran en la Figura 2. Se obtuvieron porcentajes de 86, 77 y 82 % en el ciclo 1, 2 y 3, respectivamente. Esto evidencia fenómenos de adsorción del colorante en el CMA, de hecho, la remoción es cercana al 100%. El porcentaje de remoción no difiere significativamente entre los ciclos ($p < 0.05$), lo que muestra la estabilidad del CMA en la adsorción de los colorantes rojos (eritrosina, Ponceau SX, rojo allura, litol-rubina-BK).

Los colorantes rojos analizados en el presente trabajo son del tipo azoicos (Figura 3), excepto la eritrosina, y a este

grupo pertenece el rojo Congo, cuya remoción se reportó del 77.40% utilizando un CA sintetizado a partir de hueso de pollo calcinado a 900°C (Ofudje et al., 2024).

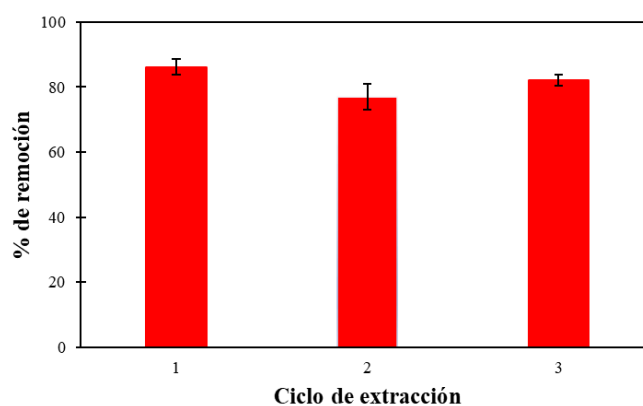


Figura 2: Porcentajes de remoción de 150 mg/L de colorantes rojos (eritrosina, Ponceau SX, rojo allura y litol-rubina-BK) en un sistema de columna empacada con carbón magnético activado, llevada a cabo en tres ciclos de extracción. Las barras muestran la desviación estándar de cada ciclo, considerando tres réplicas.

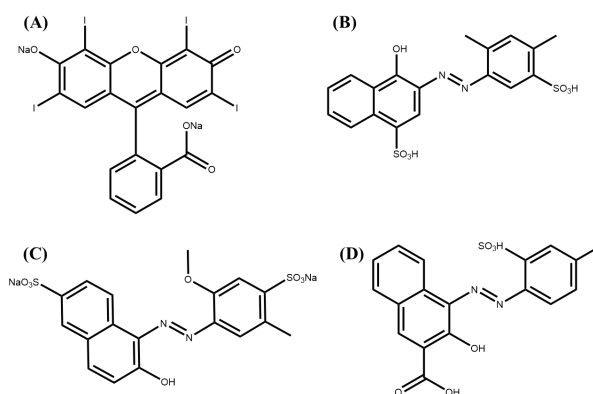


Figura 3: Estructuras químicas de los colorantes sintéticos rojos (A) eritrosina (rojo 3), (B) Ponceau SX (rojo 4), (C) Rojo allura (rojo 5) y (D) litol-rubina-BK (rojo 6).

Los resultados del presente trabajo muestran un incremento en la remoción, que se puede atribuir a la presencia del material magnético (Fe_3O_4), el cual puede también tener propiedades adsorbentes, lo que incrementa la remoción de los colorantes. Otra ventaja que presenta el CMA es la temperatura a la que se obtiene, la cual es menor que la reportada por Ofudje y colaboradores (2024), lo que reduce el gasto energético durante su síntesis.

El uso de CA como adsorbente para la remoción de colorantes ha sido reportado por otros autores, sobre todo para azul de metileno (Kundu et al., 2024; Saning et al., 2024), sin embargo, este colorante no pertenece al grupo de los azoicos, por lo que los resultados no se pueden comparar con lo encontrado en el presente trabajo.

Kundu et al. (2024) demostraron que, al aumentar la concentración de CA, aumenta la disponibilidad de sitios activos, por lo que se incrementa la remoción del colorante, a lo que se le puede atribuir los resultados del trabajo, ya que se establecieron concentraciones elevadas de colorante, sin que el adsorbente se saturara, por lo menos en tres ciclos realizados. Esto demuestra que el CMA obtenido posee mayores propiedades de adsorción que lo reportado en otros estudios.

De acuerdo con Yagmur et al. (2020), la interacción entre materiales carbonosos y colorantes es mediante el acoplamiento π - π . El anillo aromático de los colorantes interactúa con la superficie de carbono a través del sistema π -electrón del anillo. En la superficie del carbón activado se pudieron presentar procesos de fisisorción y la unión del colorante se puede atribuir al acoplamiento π - π e interacciones electrostáticas (Averhein et al., 2024; Bao et al., 2024; Benmaamar et al., 2019).

3.2. Remoción en sistema dispersivo con agua residual

En la Figura 4 se presentan los porcentajes de remoción de la mezcla de los colorantes rojo (eritrosina, Ponceau SX, rojo allura y litol-rubina-BK), azul (brillante y carmín de índigo) y negro en agua residual, los cuales fueron menores que los obtenidos en el sistema en columna. Es importante aclarar que el pigmento negro correspondió a la combinación de los colorantes rojos, azules y amarillos (tartrazina y amarillo anaranjado).

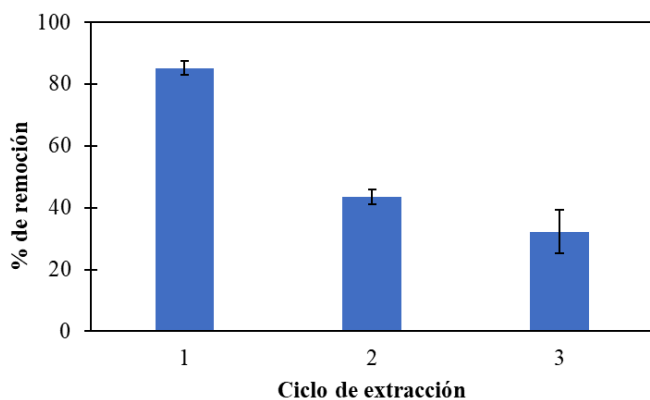


Figura 4: Porcentajes de remoción de una mezcla de 150 mg/L de los colorantes rojo (eritrosina, Ponceau SX, rojo allura y litol-rubina-BK), azul (brillante y carmín índigo) y negro (mezcla de rojos, azules y amarillos) en agua residual urbana en sistema dispersivo.

Las remociones disminuyeron de 85% (primer ciclo de extracción) hasta 32% (tercer ciclo de extracción). El principal factor al que se le atribuye esta disminución es a la presencia de otros componentes, tanto orgánicos como inorgánicos, presentes en el agua residual, los cuales saturan los sitios activos del carbón. Esto ocasiona que los colorantes entren en competencia con estos componentes, lo que de alguna manera reduce las interacciones electrostáticas π - π entre el CMA y los colorantes de interés (Saning et al., 2024).

Por otro lado, la presencia de iones cloruro y sulfato en el agua residual ocasiona que los sitios activos del CMA queden cubiertos (Ahmeda et al., 2024), lo que limita la interacción con los colorantes.

Aparentemente, esta reducción en la remoción de los colorantes puede ser una desventaja para el material sintetizado, sin embargo, al presentar interacciones con otros componentes del agua residual, es probable que permita la disminución del carbono orgánico presente en la matriz, lo que en estudios posteriores puede ser un tratamiento primario de aguas residuales.

4. Conclusiones

La metodología propuesta para la obtención de carbón magnético activado empleando BSG como materia prima y la adición de magnetita como material ferromagnético, permitió la obtención de carbón con propiedades magnéticas demostradas mediante la aplicación de un campo magnético estable con imán de neodimio, lo que facilita su separación del medio acuoso para la remoción de contaminantes.

El carbón magnético activado presentó buenas propiedades adsorbentes para los colorantes en estudio, sin embargo, en presencia de los demás componentes del agua residual, los porcentajes de remoción disminuyeron, lo cual se puede atribuir a la ocupación de los sitios activos del adsorbente.

Referencias

- Ahmed, A. A., Hattabb, Z., Berredjem, Y., Hamoudi, S., Djellabi, R. (2024). Valorization of *Silybum marianum* seed shells waste as biosorbent for basic fuchsin dye removal from water: kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100278>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Bao, Z., Lottfy, V. F., Zhou, X., Fu, S., Basta, A. H. (2024). Assessment of porous carbon from rice straw residues with potassium ferrate-assisted activation as cationic and anionic dye adsorbents. *Industrial Crops & Products*, 212, 118298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118298>
- Benmaamar, Z., Boutoumi, H., Hamitouche, H., Benmaamar, H., Benmaamar, A., Benmaamar, A., Aggoun, A. (2019). Simulation of Adsorption Kinetics of Malachite Green onto Activated Carbon. *Portugaliae Electrochimica Acta* 2, 37(2), 93-104. DOI: <https://doi.org/10.4152/pea.201902093>
- Buenaño, L., Ali, E., Jafer, A., Zaki, S. H., Hammady, F. J., Alsaadi, S. B. K., Karim, M. M., Ramadan, M. F., Omran, A. A., Alawadi, A., Alsalamy, A., Kazemi, A. (2024). Optimization by Box–Behnken design for environmental contaminants removal using magnetic nanocomposite. *Scientific Reports*, 14, 6950. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57616-8>

- Dehingia, B., Lahkar, R., Kalita, H. (2024). Efficient removal of both cationic and anionic dyes from water using a single rGO/PSS nanocomposite membrane with superior permeability and high aqueous stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 112393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112393>
- Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Banerjee, D., Ganguly, A., Nanda, S., Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 353, 120103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103>
- Jia, Z., Wu, L., Zhang, D., Han, C., Li, M., Wei, R. (2022). Adsorption behaviors of magnetic carbon derived from wood tar waste for removal of methylene blue dye. *Diamond & Related Materials*, 130, 109408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109408>
- Jiang W., Zhang, L., Guo, X., Yang, M., Lu, Y., Wang, Y., Zheng, Y., Wei, G. (2019). Adsorption of cationic dye from water using an iron oxide/activated carbon magnetic composites prepared from sugarcane bagasse by microwave method. *Environmental technology*, 42(3), 337-350. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1627425>
- Khoshmanesh, M., Sanati, A. M., Shahcheragh, S., Farjadfard, S., Bonyadi, Z., Ramavandi, B. (2024). Recent advances in dyes uptake by microplastics in aquatic environments: Influencing factors and ecotoxicological behaviors. *Arabian Journal of Chemistry*, 17, 105737. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105737>
- Kundu, D., Sharma, P., Bhattacharya, S., Gupta, K., Sengupta, S., Shang, J. (2024). Study of methylene blue dye removal using biochar derived from leaf and stem of *Lantana camara L.* *Carbon Research*, 3, 22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00108-1>
- Ofudje, E. A., MohammedAl-Ahmary, K., F.Alshdoukhi, I., Alrahili, M. R., Kavil, Y. N., Alelyani, S. S., Bakheet, A. M., Al-Sehemi, A. G. (2024). Nano round polycrystalline adsorbent of chicken bones origin for Congo red dye adsorption. *Scientific Reports*, 14, 7809. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57412-4>
- Ramamurthy, K., Priya, P. S., Murugan, R., & Arockiaraj, J. (2024). Hues of risk: investigating genotoxicity and environmental impacts of azo textile dyes. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33444-1>
- Saning, A., Thanachayanont, C., Suksai, L., Watcharin, W., Techasakul, S., Chuenchom, L., Dechtrirat, D. (2024). Green magnetic carbon/alginate biocomposite beads from iron scrap waste for efficient removal of textile dye and heavy metal. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, 129765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129765>
- Sivaranjane, R., Kumar, P. S., Rangasamy, G. (2024). Hydrothermally produced activated carbon spheres from discarded maize cobs for efficient removal of rose bengal dye from water environment. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100123>
- Yagmur, E., Gokcea, Y., Tekina, S., Semercib, N. I., Aktasa, Z. (2020). Characteristics and comparison of activated carbons prepared from oleaster (*Elaeagnus angustifolia L.*) fruit using KOH and ZnCl₂. *Fuel*, 267, 117232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117232>
- Zhang, S., Tao, L., Jiang, M., Gou, G., Zhou, Z. (2015). Single-step synthesis of magnetic activated carbon from peanut shell. *Materials Letters*, 157, 281-284. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.117>.