



Bio-adsorbente natural a partir de piel de aguacate para la remoción de un colorante catiónico modelo, azul de metileno

Natural bio-adsorbent from avocado skin for the removal of a model cationic dye, methylene blue

Sayra L. Orozco-Cerros*¹, J. Espino-Valencia¹, L.B. López-Sosa²,
Michel A. Rivero-Corona³

¹Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, 58060 Michoacán, México

²Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carr. Pátzcuaro-Erongaricuaru Km. 3 (Quinta Tzipecua), 61613 Huecorio, Michoacán, México

³Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta Morelia, 58190 Michoacán, México.

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 15, 2023

Aceptado / *Accepted*: Octubre / *October* 14, 2023

Publicado / *Published*: Enero 01, 2024 (Número 1, enero-junio) / *January 01, 2024 (Number 1, January-June)*

Resumen

La industrialización del aguacate (*Persea americana*) ha traído grandes retos. Uno de ellos es el manejo integral de residuos de piel y semilla que, por la cantidad generada y su manejo inadecuado, representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas. En esta investigación se presenta el desarrollo de un bio-adsorbente a partir de residuos de piel de aguacate y su aplicación en la remoción de un colorante catiónico modelo, azul de metileno, AM. El bio-adsorbente fue desarrollado por un método hidrotérmico a 70°C en condiciones ácidas suaves. Fue caracterizado por difracción de rayos X, espectroscopía IR, análisis termogravimétrico y microscopía de barrido electrónico. El diseño experimental evaluó el efecto de la concentración de disoluciones acuosas del material a adsorber AM (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹), la temperatura (293, 308 y 323 K) y el valor de pH (2, 4, 6, 8 y 10) en la capacidad adsorbente usando como control carbón activado comercial (CAC). El material bio-adsorbente obtenido de la piel de aguacate tiene una estructura característica de celulosa y la espectroscopía IR confirma la presencia de grupos funcionales asociados con este material. Fue eficaz en la remoción del colorante, alcanzando de 99 a 76% de remoción con 5 y 40 mg L⁻¹ de colorante, respectivamente, a un valor de pH 7 y una temperatura de 293 K. Los resultados experimentales se ajustaron a dos modelos cinéticos de difusión y a un modelo de difusión intra-partícula. También demostraron que la constante de velocidad decreció con la concentración de colorante. Se evaluaron los parámetros termodinámicos del proceso, determinando con ellos que el mecanismo de adsorción es por quimisorción y que es exotérmico y espontáneo. El estudio de reutilización del material bio-adsorbente muestra que, después de 8 ciclos continuos, al incrementar la concentración del colorante, el bio-adsorbente se satura rápidamente, removiendo solamente un 20% de colorante en los últimos 4 ciclos.

Palabras clave: Bio-adsorbente de piel de aguacate (*Persea americana*), azul de metileno, efectos de concentración temperatura y pH

Abstract

The industrialization of avocado (Persea Americana) has brought great challenges. One of them is the comprehensive management of skin and seed waste that, due to the amount generated and its inadequate management, represents a risk to human health and ecosystems. This research presents the development of a bio-adsorbent from avocado peel waste and its application in the removal of a model cationic dye, methylene blue, AM. The bio-adsorbent was developed by a hydrothermal method at 70°C under mild acidic conditions. It was characterized by X-ray diffraction, IR spectroscopy, thermogravimetric analysis, and scanning electron microscopy. The experimental design evaluated the effect of the concentration of aqueous solutions of the material to be adsorbed AM (2.5, 5, 10, 20 and 40 mg L⁻¹), the temperature (293, 308 and 323 K), and the pH

value (2, 4, 6, 8 and 10) in the adsorbent capacity using commercial activated carbon (CAC) as a control. The bio-adsorbent material obtained from avocado peel has a characteristic cellulose structure and IR spectroscopy confirms the presence of functional groups associated with this material. It turned out to be effective in removing the dye, reaching 99 to 76% removal with 5 and 40 mg L⁻¹ of dye, respectively, at pH of 7, and temperature of 293 K. The experimental results were fitted to two diffusion kinetic models and an intra-particle diffusion model. They also showed that the rate constant decreased with dye concentration. The thermodynamic parameters of the process were evaluated, determining that the adsorption mechanism is by chemisorption and that it is exothermic and spontaneous. The reuse study of the bio-adsorbent material indicate that, after 8 continuous cycles, by increasing the concentration of the dye, the bio-adsorbent quickly saturates, removing only 20% of the dye in the last 4 cycles.

Keywords: Bio-adsorbent from avocado skin (*Persea Americana*), methylene blue, effects of concentration, temperature and pH

Introducción

En la última década, la producción mundial de aguacate (*Persea americana*) se ha duplicado hasta alcanzar 8.4 millones de toneladas métricas en 2022. El 30% de la producción mundial proviene de México posicionándolo en el primer lugar como exportador de aguacate (World Avocado Map, 2023). El estado de Michoacán es el principal abastecedor de esta fruta, lo que ha traído grandes retos en términos de manejo de suelo, consumo de recursos y los impactos derivados de la industrialización del fruto. La industrialización del aguacate está incrementando debido a la alta demanda de productos de consumo alimentario y en industrias cosméticas (Ahmad y Danish, 2022), lo que ha contribuido a un incremento en la generación de residuos de piel y semilla de aguacate. El manejo integral de los residuos provenientes de la industrialización de aguacate constituye un reto, debido a la cantidad generada de residuos de semilla y piel. En 2019 se estimó una generación de 2 millones de toneladas de semilla y piel, a nivel global.

Los residuos de la industrialización de aguacate pueden ser valorados y aprovechados para el desarrollo de bio-adsorbentes por su composición. Lo anterior es debido a que la piel y semilla de aguacate están compuestos principalmente por polímeros como celulosa, lignina y hemicelulosa, conteniendo grupos funcionales que facilitan la adsorción de moléculas orgánicas complejas (Asiagwu et al., 2013; 2017).

Los bio-adsorbentes son materiales provenientes de recursos biomásicos que pueden o no ser activados por diferentes procesos químicos y térmicos. Los bio-adsorbentes naturales son aquellos que mantienen las características superficiales, no involucran el uso de agentes activantes ni procesos térmicos a alta temperatura (>600°C), por lo son materiales de bajo costo. En los bio-adsorbentes activados se funcionaliza la superficie e implican procesos térmicos y químicos que consumen energía (Al-Gheethi et al., 2022; Besegatto et al., 2021; Liu et al., 2022; Yadav et al., 2022).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar un material bio-adsorbente natural producido con piel de aguacate dándole un valor agregado. La caracterización incluyó su desempeño en un diseño experimental removiendo azul de metileno, AM, disuelto en agua considerando como variables a la concentración de AM en agua y la temperatura y pH de operación usando un carbón activado comercial como control y teniendo como variable de respuesta la capacidad de adsorción del bio-adsorbente. Asimismo, se caracterizó el biomaterial termodinámica y físicamente.

Metodología

Reactivos. El colorante catiónico azul de metileno (C₁₆H₁₈ClN₃S) fue usado como contaminante modelo en disoluciones acuosas a 2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹. Como agente acidificante en la síntesis del bio-adsorbente se usó H₃PO₄ al 85% en agua destilada. Para controlar la fuerza iónica en la evaluación del punto isoeléctrico del bio-adsorbente se empleó KCl (0.1 M) (Aichour et al., 2018). Para el ajuste de los valores de pH en estudio (2, 4, 6, 8 y 10) se emplearon HCl al 37% en agua destilada

y KOH al 85% en agua destilada. Todos los reactivos fueron de grado analítico (QP) suministrados por Merck.

Preparación de la biomasa en estudio: Piel de aguacate (*Persea americana*). Las pieles de aguacate fueron lavadas con agua de la llave para eliminar la pulpa. Fueron cortadas en piezas pequeñas (1×1 cm) de forma manual, secadas a 50°C por 72 horas en una estufa Memmert VO29cool (Alemania) y molidas en un molino KLT- KMDJ-2A (India) para producir un polvo de tamaño de partícula >450 micrómetros (Orozco et al., 2024). El polvo de piel de aguacate se etiquetó como PA.

Síntesis del bio-adsorbente de piel de aguacate (BA-PA). El polvo de piel de aguacate (PA) se sometió a un proceso hidrotérmico a 70°C por 3 horas en condiciones ácidas con H₃PO₄ (1% en vol. o fracción mol) (Aguilar-Rosero et al., 2022). Después del proceso hidrotérmico, el bio-adsorbente de piel de aguacate (BA-PA) fue lavado con agua desionizada, DI, hasta alcanzar un pH neutro y secada a 50°C por 12 horas. Se almacenó para su uso posterior en un desecador.

Determinación del punto isoeléctrico (PIE) del biomaterial adsorbente (BA-PA). El valor del pH en el PIE fue determinado mediante el cambio de valor de pH registrado después del equilibrio químico, controlando la fuerza iónica con KCl (0.1 M) (Aichour et al., 2018). El procedimiento fue el siguiente: Se preparó un volumen de solución acuosa de KCl 0.1 M y su pH inicial se ajustó al pH deseado (valores de pH considerados 2, 4, 6, 8 y 10 usando KOH o HCl). Su valor es pH_i. Se agregaron a la solución 2 g L⁻¹ de BA-PA y se mantuvieron en agitación por 48 horas a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo, se midió el valor del pH final y se registró como pH_f. El procedimiento se repitió para los cinco valores en estudio. El valor de pH en el PIE se obtiene al graficar el cambio ($\Delta\text{pH}=\text{pH}_f-\text{pH}_i$) como función del pH. El valor de pH en el PIE corresponde a la intersección de la curva con el origen (cero).

Caracterización física del PA y del BA-PA. Ambos materiales fueron caracterizados por difracción de rayos X, por espectroscopía IR, mediante análisis termogravimétricos y por microscopía electrónica de barrido. Difracción de rayos X: Las estructuras cristalinas del polvo de PA y del de BA-PA fueron analizadas usando el difractómetro Bruker D2-Phaser CuK α a 30 kV y 10 mA. Espectroscopía IR: La identificación de los grupos funcionales presentes en los materiales fue realizada con un espectrofotómetro IR Thermo Scientific Nicolet iS10. Los análisis termogravimétricos de PA y BA-PA se obtuvieron utilizando un equipo TA Instruments (TGA 5500), bajo atmósfera de nitrógeno a 30 cm³ min⁻¹ calentado desde 25 hasta 850°C (10°C min⁻¹). Microscopía de barrido electrónico: La morfología del BA-PA fue observada con un microscopio JEOL JSM IT300.

Capacidad adsorbente del BA-PA. La aplicación del BA-PA en la remoción del colorante modelo AM fue llevada a cabo en un sistema con operación hidrodinámica intermitente, con control de temperatura y en agitación constante para garantizar el contacto entre el bio-adsorbente y el material a adsorber⁸ (Orozco et al., 2024). Como se mencionó arriba, el diseño experimental evalúa el efecto de la concentración de disoluciones acuosas del material a adsorber AM (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹), la temperatura (293, 308 y 323 K) y el valor de pH (2, 4, 6, 8 y 10) en la capacidad adsorbente usando como control carbón activado comercial (CAC). La concentración de BA-PA empleada fue de 0.5 g L⁻¹. El procedimiento experimental para la bio-adsorción del AM se inició preparando las disoluciones de colorante AM (2.5, 5, 10, 20 o 40 mg L⁻¹). El valor de pH de la solución de colorante se ajustó (3, 5, 7 o 9), empleando una solución de HCl o KOH) y se recolectó la muestra a $t=0$ min (t , tiempo de experimentación). El bio-adsorbente BA-PA fue agregado a la solución de colorante para tener una concentración de 0.5 g L⁻¹. La suspensión se mantuvo en agitación constante durante 4 horas. Durante este lapso se recolectaron muestras a $t=15, 30, 60, 120, 180$ y 240 min, las cuales fueron

⁸ El verbo adsorber está definido en el Glosario y su participio pasado adsorbido se usa como adjetivo y en ocasiones como sustantivo para definir a sustancias que son adsorbidas (y es importante mencionar en una publicación científica que, en vez de usar el español se emplean anglicismos como "adsorbate" que, naturalmente, no existe en español) [Nota de los(as) editores(as)]

centrifugadas a 7500 rpm y la concentración de AM fue analizada por Espectroscopía UV-Vis. La concentración de AM durante el proceso de adsorción fue analizada a una longitud de onda característica de $\lambda_{\text{car}} = 605 \text{ nm}$ empleando un espectrofotómetro VE-5100UV-Vis.

Análisis estadístico de los datos experimentales y los calculados. Los datos fueron analizados usando la desviación promedio de los resultados obtenidos, para evaluar la dispersión de estos con respecto del promedio.

Resultados y discusión

Caracterización de PA y BA-PA

Difracción de Rayos X. En la Figura 1 se presenta el patrón de difracción de rayos X del polvo de piel de aguacate (PA) y del BA-PA. Los patrones de difracción de rayos X de PA y BA-PA tienen baja cristalinidad, lo cual es característico de materiales compuestos por lignina, celulosa y hemicelulosa (Pereira et al., 2021). En la Figura 1 se observan picos de intensidad baja a $2\theta = 17.5^\circ$ y 21.5° para los materiales de PA y BA-PA, respectivamente. Estos picos están asociados con la región de celulosa cristalina I, indexada con patrón de difracción estándar JCPDS 00-056-1718 (*Joint Committee of Powder Diffraction Standards* por sus siglas en inglés) (Ishikawa et al., 2015). Es importante mencionar que el proceso hidrotérmico empleado para BA-PA modifica la cristalinidad del material debido a la descomposición parcial de la lignina, celulosa y hemicelulosa.

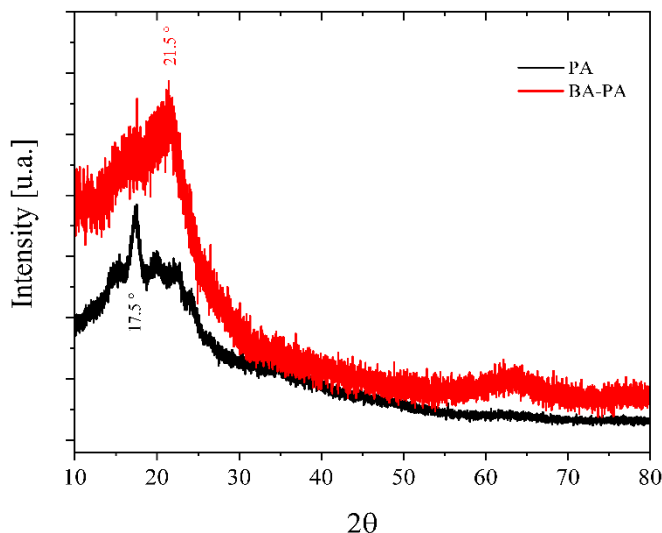


Figura 1. Patrones de difracción de rayos X del polvo de piel de aguacate, PA, así como del Bio-adsorbente de piel de aguacate, BA-PA

Espectroscopía IR. En la Figura 2 se presentan los espectros IR para los materiales PA y BA-PA. En los espectros para PA y BA-PA se muestra una banda amplia a 3280 cm^{-1} que corresponde a la vibración de estiramiento de H-O-H. La banda observada entre $2820\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$, en ambos materiales, es atribuida a estiramientos simétricos y asimétricos de C-H (sp^3) de compuestos insaturados (alqueno) (Berrazoum et al., 2015; Enahoro, 2016; Mokhtari et al., 2021). En ambos espectros se observa un pico débil a 1733 cm^{-1} que está relacionado con la vibración de la estructura carbonilo C=O (Besegatto et al., 2021). A 1100 y 1152 cm^{-1} están presentes picos débiles relacionados con el grupo C-O de los alcoholes (Cheng et al., 2017; Pereira et al., 2021). El pico asociado con el enlace C-C (1100 cm^{-1}) para el bio-adsorbente BA-PA tiene una menor intensidad con respecto del de PA, lo cual se puede atribuir a la descomposición de la celulosa, lignina y hemicelulosa, durante el tratamiento

hidrotérmico en condiciones ácidas. Los grupos funcionales observados están presentes en la celulosa, lo que corrobora los resultados obtenidos mediante DRX (ver Figura 2).

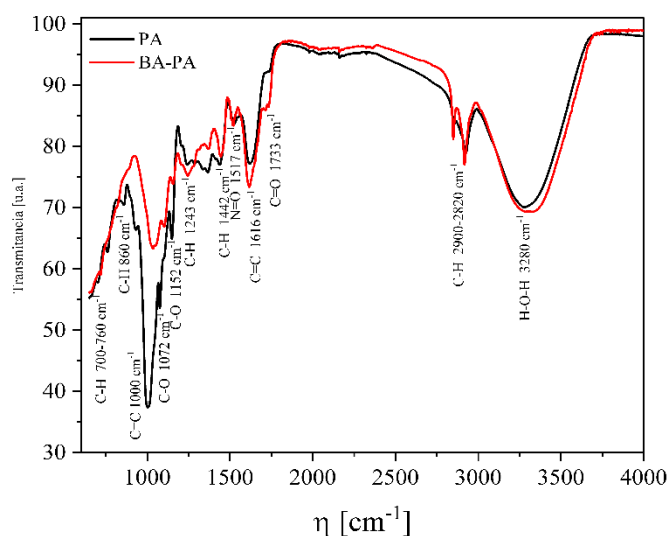


Figura 2. Espectros IR de la PA y del bio-adsorbente BA-PA

Análisis termogravimétricos. Los análisis de PA y BA-PA se llevaron a cabo en atmósfera de nitrógeno desde la temperatura ambiente hasta 850°C, como ya se mencionó. En las Figuras 3(a) y (b) se mostraron los porcentajes de pérdida de masa y las derivadas de pérdida de masa con respecto del cambio de temperatura como función de la temperatura para los materiales PA y BA-PA. De este análisis se puede apreciar que los materiales PA y BA-PA están constituidos principalmente por celulosa (Figuras 1 y 2) y, en menor medida, hemicelulosa, lignina y macromoléculas. Para los materiales PA y BA-PA, se distinguen tres etapas en la Figura 3(a). A continuación, se describen las etapas para PA y BA-PA.

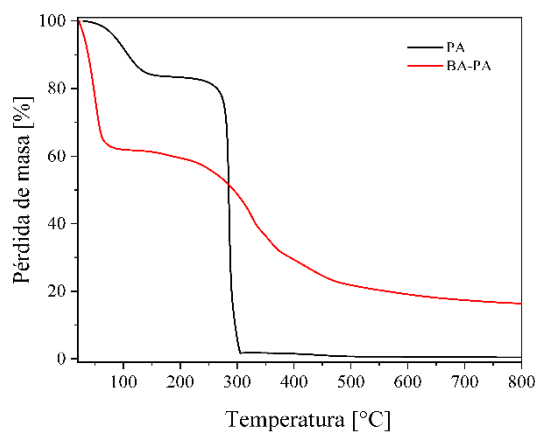


Figura 3 (a). Pérdida de masa

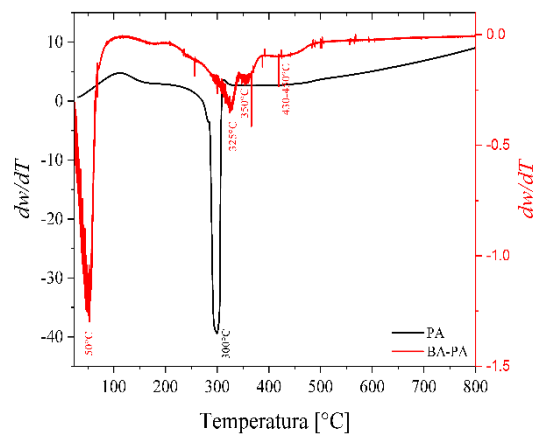


Figura 3 (b). Derivada del cambio de masa, m , con respecto de la temperatura, T , como una función de la temperatura de la muestra de BA-PA

En la Figura 3(a), para ambos materiales, es posible distinguir tres rangos de temperatura.

Para el PA:

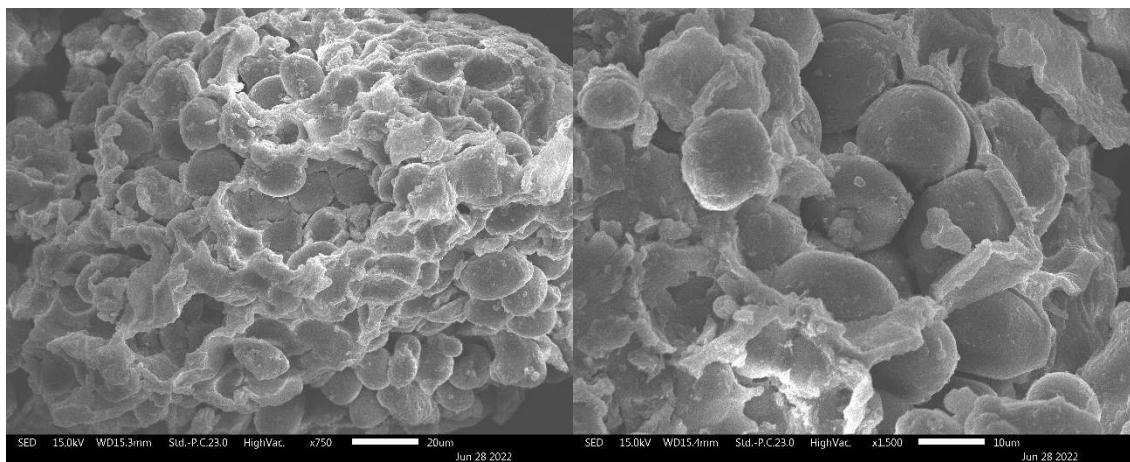
- i) de 25 a 150°C se observa una pérdida de masa de 16%;
- ii) de 250 a 310°C se observa una pérdida de masa de 83.3%, y
- iii) de 310 a 500°C con una pérdida total (<1%).

Para el BA-PA:

- i) de 25 a 100°C se observa una pérdida de masa de 38%, la cual es atribuida al agua adsorbida y superficial en la estructura, para ambos materiales;
- ii) de 200 a 350°C se observa una pérdida de masa de 24%, que es atribuido a la descomposición de celulosa y hemicelulosa, y
- iii) de 350 a 500°C con una pérdida de 14.5%, debida a la descomposición de celulosa y lignina (Paniagua et al., 2021).

El material restante después de 850°C corresponde al contenido de minerales del polvo de PA y el del BA-PA. En el gráfico de la Figura 3(b) de la derivada de masa con respecto del cambio de temperatura se pueden observar picos exotérmicos. Para PA a 300°C, el pico exotérmico está relacionado con la descomposición de poliglúcidos⁹. Para BA-PA, el pico a 50°C está asociado a un proceso de cristalización y los picos a 325, 350 y 430°C relacionados con la descomposición de poliglúcidos y macromoléculas del bio-adsorbente.

Microscopía electrónica de barrido. En las Figuras 4(a) y 4(b) se muestra la morfología de PA y del bio-adsorbente BA-PA, respectivamente.



(a)
Figura 4 (a). Morfología del polvo de piel de aguacate, PA

Las micrografías fueron obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés). Para PA se pueden observar esferas de poliglúcidos de un tamaño de ~15 μm .

⁹ Existe, para peso y masa, una enorme confusión por parte del público en general e incluso por autoridades y científicos: Uno, el peso es una fuerza que se mide en Newtons y la otra, la masa, es una propiedad de los cuerpos y se mide en kilogramos, ambas unidades del Sistema Internacional de Unidades. Por tanto, la masa corporal o la masa de los reactivos se pesa en una balanza analítica o una báscula pero lo que miden es nuestra masa o la de los reactivos. Igualmente, hay la creencia de que todos los compuestos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno antes conocidos como hidratos de carbono, después con el anglicismo carbohidratos y, últimamente, como sacáridos como si fueran derivados de la sacarosa, nombre científico del azúcar (de caña y remolacha). En realidad son glúcidos ya que se derivan de la molécula de glucosa. La propia sacarosa o azúcar es un diglúcido formado por glucosa y fructosa. La celulosa es un polímero de glucosas unidas entre ellas y lo mismo ocurre con la hemicelulosa y la lignina. Lo que las plantas forman durante la fotosíntesis a partir del dióxido o bióxido de carbono y el agua con la energía radiante del sol (fotones o hv) es justamente la glucosa y luego la planta las polimeriza para formar la celulosa [Nota de los(as) editores(as)]

Una vez que el polvo de piel de aguacate PA se somete a un proceso hidrotérmico a condiciones ácidas, se observa que dominan las estructuras disgregadas, amorfas y heterogéneas con geometría no uniforme. La morfología del polvo de BA-PA, que es el bio-adsorbente de piel de aguacate, es característica de materiales de celulosa, hemicelulosa y lignina [PA, ver Figura 4(b)] que han sido sometidos a tratamientos térmicos en condiciones ácidas, en donde ha comenzado la descomposición de estos polímeros (Costa et al., 2021). Estos resultados corroboran los observados en las Figuras 1, 2 y 3.

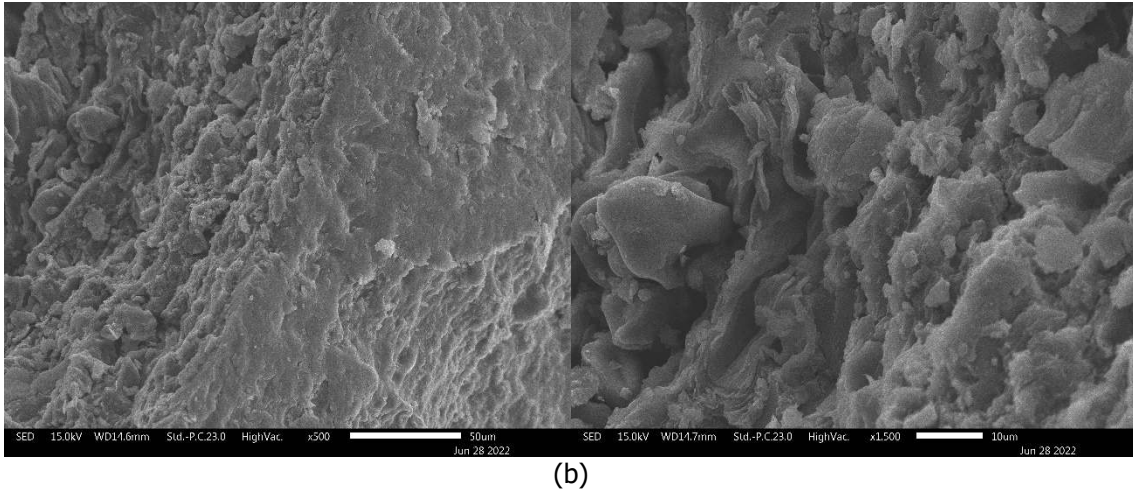


Figura 4 (b). Morfología del polvo de bio-adsorbente de piel de aguacate BA-PA

Punto isoeléctrico (PIE) del biomaterial adsorbente (BA-PA). En la Figura 5 se muestra ΔpH como función del valor de pH. Ese valor en el PIE de BA-PA es de 1.94. El bio-adsorbente BA-PA tiene una carga positiva en valores de pH por debajo del PIE y una carga superficial negativa por encima de este pH. Por lo tanto, a valores neutros se facilita la adsorción de moléculas orgánicas, cargadas parcialmente positivas y cationes metálicos.

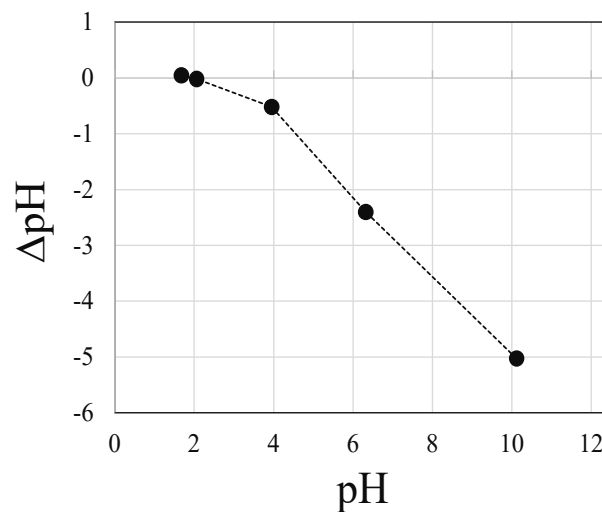


Figura 5. Cambio del valor de pH como función del pH del BA-PA. El valor de pH en el PIE es 1.94

Capacidad adsorbente del BA-PA para la remoción del AM. El proceso de adsorción está influenciado por diferentes parámetros como el pH, la proporción de material adsorbente y de material adsorbido (ver Glosario sobre el verbo adsorber), la temperatura, los aditivos, entre otros, siendo el valor de pH uno de los parámetros más importantes, ya que puede imposibilitar o favorecer el proceso. El valor de pH modifica la carga superficial del adsorbente y la ionización del material a ser adsorbido. Para estudiar la influencia del valor de pH sobre el proceso de bio-adsorción, se desarrollaron una serie de experimentos a diferentes valores de pH, empleando una concentración de material a ser adsorbido (AM) que aquí se ejemplifica con la de 20 mg L^{-1} y de adsorbente de 0.5 g L^{-1} , a una temperatura de 293K.

En la Figura 6 se muestran los perfiles de remoción de colorante AM a diferentes valores de pH. Como se puede observar al aumentar el pH de 3 a 9, el porcentaje de remoción se incrementa de 83% (a valores de pH de 3 y 5) hasta 93% (a valores de pH de 7 y 9). Esto se puede atribuir a que la superficie del bio-adsorbente está cargada negativamente a valores de pH por encima del pH en el punto isoelectrónico, PIE, lo que favorece la adsorción del colorante catiónico AM, por interacción electrostática (Uddin y Nasar, 2020). Para valores de pH de 7 a 9, la remoción después de 240 minutos es de 93% en ambos casos. Esto indica que el proceso de adsorción se llevará a cabo a pH de 7, minimizando el uso de agentes químicos. Estos resultados son consistentes con lo reportado por los autores Radoor et al. (2022).

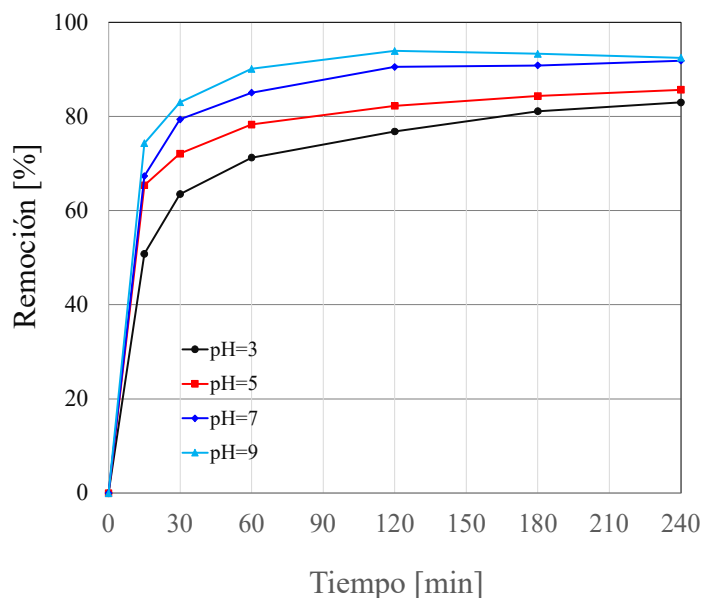
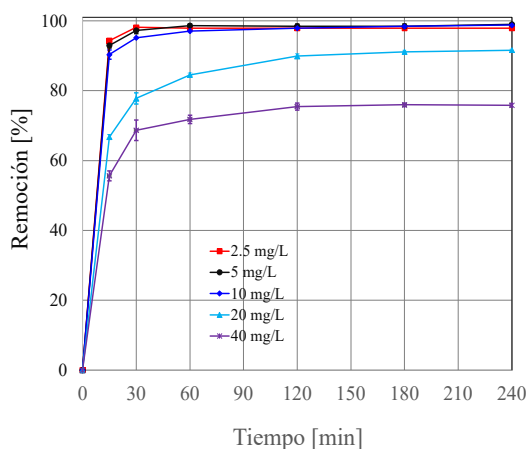


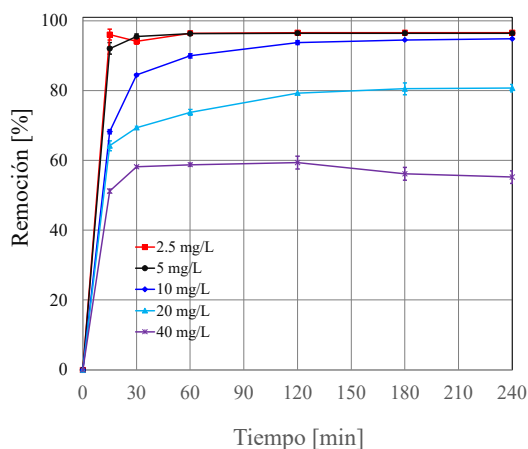
Figura 6. Perfiles de remoción del colorante AM a diferentes valores de pH empleando una concentración del colorante adsorbido (AM) de 20 mg L^{-1} y del bio-adsorbente (BA-PA) de 0.5 g L^{-1} , a una temperatura de 293K

La temperatura y la concentración de AM afectan la eficacia del proceso de adsorción. La cantidad de AM modifica la velocidad de adsorción. La temperatura afecta la energía de activación. A continuación, se muestran los resultados obtenidos del estudio de la concentración del material adsorbido y de la temperatura, durante el proceso de adsorción. Todos los experimentos fueron desarrollados por triplicado.

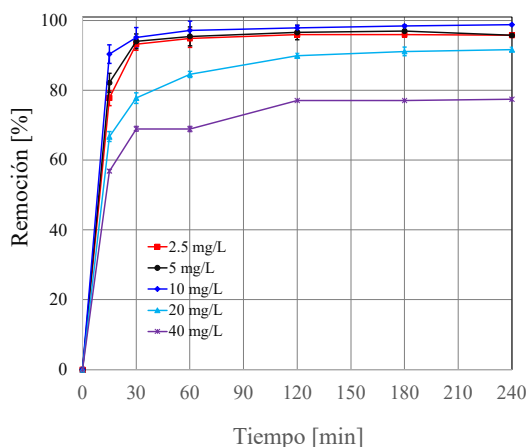
En la Figura 7 se ejemplifican los resultados de remoción del colorante AM a diferentes concentraciones de colorante adsorbido AM (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹) y de temperatura (293, 308 y 323 K), a una concentración de agente adsorbente BA-PA de 0.5 g L⁻¹ y a un valor de pH de 7. Para las tres temperaturas (293, 308 y 323 K) se puede observar que al incrementar la concentración del material a ser adsorbido de 2.5 a 40 mg L⁻¹, el % de remoción decrece (Nguyen Hoc Thang et al., 2021). Este comportamiento podría ser atribuido a que, al incrementar las moléculas del material que debe adsorberse, manteniendo constante la cantidad de sitios (concentración fija de adsorbente), una mayor cantidad de moléculas de AM compiten por sitios activos de adsorción, hasta alcanzar el equilibrio químico (Uddin y Nasar, 2020).



(a) T = 293 K



(b) T = 308 K



(c) T = 323 K

Figura 7. Perfiles de remoción de colorante AM a diferentes concentraciones de colorante a ser adsorbido (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹), concentración de bio-adsorbente de 0.5 g L⁻¹, a temperatura de (a) 293, (b) 308 y (c) 323 K y a pH de 7

A temperatura ambiente, 293 K [ver Figura 7(a)], el % de remoción de AM alcanzado es de 99% a 2.5, 5 y 10 mg L⁻¹. Para 20 y 40 mg L⁻¹ se alcanza una remoción de 92 y 76%, respectivamente. En la Figura 7(b), a 308 K, el proceso de remoción del AM alcanza valores similares que los obtenidos a 293 K. Para una temperatura de 323 K [ver Figura 7(c)], a concentraciones de colorante adsorbido de

2.5, 5 y 10 mg L⁻¹, los porcentajes de remoción disminuyen de 99 a 95%, con respecto de los obtenidos con T=293 y 308 K. Esto no ocurre para concentraciones de 20 y 40 mg L⁻¹, cuyos porcentajes de remoción son 80 y 55%, respetivamente, que son inferiores a los obtenidos para T=293 y 308 K (90 y 80% para las mismas concentraciones).

Cinética de adsorción

La cinética de adsorción es importante debido a que provee información sobre el mecanismo de adsorción, como los fenómenos de transferencia de materia interna y externa. En la literatura se han reportado modelos cinéticos de pseudo-primero y segundo orden para describir el proceso de adsorción en solución acuosa (Pereira et al., 2021; Sahu y Singh, 2019). Los datos experimentales del proceso de adsorción a diferentes concentraciones de colorante a ser adsorbido de 2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹ y temperaturas (293, 308 y 323 K, ver Figura 7) se ajustaron a dos modelos cinéticos linealizados usando el método de mínimos cuadrados, Ecs. (1) y (2). El modelo cinético de pseudo-primero orden describe un proceso de fisiorción, Ec. (1), y el de pseudo-segundo orden, un proceso de para quimisorción, Ec. (2) (Cheng et al., 2017; Pereira et al., 2021; Wang et al., 2020). Además, los datos se ajustaron a un modelo de difusión intra-partícula, Ec. (3):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e + k_1 t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

$$q_t = k_d t^{1/2} + C \quad (3)$$

donde k_1 (min⁻¹) y k_2 (g mg⁻¹ min⁻¹) son las constantes cinéticas de adsorción de pseudo primero y segundo orden, k_d (g mg⁻¹ min^{-1/2}), es la constante cinética de difusión intra-partícula, q_e (mg g⁻¹), Ec. (4) y q_t (mg g⁻¹), Ec. (5) es la cantidad de colorante AM adsorbido por cada gramo de adsorbente BA-PA en el equilibrio y a un tiempo dado, respectivamente. C (mg g⁻¹) está relacionado con el espesor de la capa de frontera de difusión.

$$q_e = \frac{C_{AM,e} - C_{AM,i}}{V} \quad (4)$$

$$q_t = \frac{C_{AM,e} - C_{AM,t}}{V} \quad (5)$$

$C_{AM,0}$, $C_{AM,e}$, $C_{AM,t}$ (mg L⁻¹) es la concentración inicial, en equilibrio y en cada tiempo del colorante AM, respectivamente. V es el volumen del sistema.

Los valores de las constantes obtenidas del ajuste de los resultados experimentales a los modelos cinéticos [Ecs. (1), (2) y (3)] se presentan en la Tabla 1 para las diferentes concentraciones de AM y temperaturas.

Tabla 1a. Parámetros cinéticos del proceso de bioadsorción con el BA-PA

| T, K | AM, mg L ⁻¹ | Pseudo primer orden | | | Pseudo segundo orden | | |
|---------|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|---|-----------------------------------|--------------|
| | | k_1, min^{-1} | $q_e, \frac{\text{mg}}{\text{g}}$ | R^2 | $k_2, \frac{\text{mg g}^{-1}}{\text{min}^{-1}}$ | $q_e, \frac{\text{mg}}{\text{g}}$ | R^2 |
| 293 | 2.5 | 0.219±0.005 | 4.272±0.012 | 0.999±0.000 | 0.419±0.024 | 4.297±0.011 | 0.999±0.000 |
| | 5 | 0.191±0.003 | 9.414±0.028 | 0.999±0.001 | 0.109±0.007 | 9.519±0.021 | 0.999±0.000 |
| | 10 | 0.171±0.008 | 16.951±0.079 | 0.999±0.000 | 0.040±0.003 | 17.242±0.063 | 0.999±0.000 |
| | 20 | 0.085±0.001 | 30.598±1.069 | 0.991±0.001 | 0.005±0.000 | 32.353±1.077 | 0.999±0.000 |
| | 40 | 0.088±0.002 | 62.661±0.980 | 0.997±0.001 | 0.003±0.000 | 65.887±1.033 | 0.997±0.001 |
| | 2.5 | 0.113±0.044 | 5.329±0.093 | 0.999±0.000 | 0.054±0.005 | 5.497±0.077 | 0.995±0.005 |
| | 5 | 0.128±0.003 | 10.483±0.176 | 0.999±0.000 | 0.036±0.002 | 10.754±0.154 | 0.997±0.0001 |

| T, K | AM, $mg L^{-1}$ | Pseudo primer orden | | | Pseudo segundo orden | | |
|--------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------|-------------|
| | | k_1, min^{-1} | $q_e, \frac{mg}{g}$ | R^2 | $k_2, \frac{mg g^{-1}}{min^{-1}}$ | $q_e, \frac{mg}{g}$ | R^2 |
| 308 | 10 | 0.093±0.004 | 17.395±0.135 | 0.999±0.000 | 0.011±0.001 | 18.121±0.064 | 0.992±0.002 |
| | 20 | 0.100±0.001 | 27.309±0.252 | 0.988±0.001 | 0.007±0.000 | 28.692±0.265 | 0.998±0.000 |
| | 40 | 0.090±0.000 | 69.565±0.493 | 0.989±0.001 | 0.002±0.0001 | 73.415±0.561 | 0.995±0.000 |
| 323 | 2.5 | 0.300±0.000 | 4.952±0.046 | 0.999±0.000 | 0.559±0.000 | 4.968±0.035 | 0.999±0.000 |
| | 5 | 0.210±0.018 | 8.794±0.131 | 0.999±0.000 | 0.167±0.050 | 8.870±0.112 | 0.999±0.000 |
| | 10 | 0.085±0.001 | 16.480±0.301 | 0.998±0.001 | 0.009±0.000 | 17.368±0.314 | 0.998±0.000 |
| | 20 | 0.106±0.005 | 25.584±0.183 | 0.987±0.002 | 0.008±0.000 | 26.815±0.173 | 0.997±0.001 |
| | 40 | 0.150±0.006 | 47.792±2.166 | 0.994±0.002 | 0.015±0.004 | 48.374±2.375 | 0.99±0.001 |

Tabla 1b. Parámetros cinéticos del proceso de bioadsorción con el BA-PA

| T, K | AM, $mg L^{-1}$ | Difusión | | |
|--------|-----------------|------------------------------------|-------------------|-------------|
| | | $K_d, \frac{mg g^{-1}}{min^{1/2}}$ | $C, \frac{mg}{g}$ | R^2 |
| 293 | 2.5 | 0.833±0.003 | 0.201±0.005 | 0.937±0.003 |
| | 5 | 1.808±0.016 | 0.427±0.002 | 0.939±0.001 |
| | 10 | 3.207±0.033 | 0.740±0.049 | 0.941±0.006 |
| | 20 | 3.883±0.225 | 3.107±0.231 | 0.897±0.004 |
| | 40 | 8.120±0.056 | 6.367±0.709 | 0.895±0.017 |
| 308 | 2.5 | 0.979±0.037 | 0.125±0.014 | 0.981±0.003 |
| | 5 | 1.953±0.063 | 0.316±0.026 | 0.970±0.003 |
| | 10 | 3.068±0.099 | 0.268±0.019 | 0.991±0.005 |
| | 20 | 3.343±0.129 | 3.329±0.116 | 0.857±0.006 |
| | 40 | 8.683±0.015 | 7.9656±0.329 | 0.862±0.007 |
| 323 | 2.5 | 0.958±0.017 | 0.281±0.011 | 0.909±0.004 |
| | 5 | 1.699±0.053 | 0.415±0.028 | 0.935±0.004 |
| | 10 | 2.797±0.083 | 0.278±0.035 | 0.989±0.002 |
| | 20 | 3.232±0.008 | 3.231±0.251 | 0.850±0.019 |
| | 40 | 6.578±0.342 | 6.727±0.389 | 0.841±0.001 |

El ajuste tiene coeficientes de determinación (R^2) del orden de 0.9 a 1.0. Como se puede observar, q_e se incrementa con la concentración de AM (Uddin y Nasar, 2020) para las tres temperaturas (293, 308 y 323 K) en ambos modelos cinéticos de adsorción, Ecs. (1) y (2).

A 293 K, k_1 decrece con el incremento de concentración de AM. Para 308 K, la velocidad de reacción no se ve influenciada por la concentración de colorante AM. Para 323 K, k_1 no se ve influenciada para valores de la concentración del AM de 10-40 $mg L^{-1}$. En una siguiente etapa se realizará un análisis estadístico exhaustivo de los datos experimentales para definir el efecto de cada variable.

La constante de pseudo-segundo orden k_2 , para $T=293$ y 308 K, decrece con el incremento de la concentración del AM. Para una temperatura de 323 K, k_2 no se ve influenciada cuando la concentración de AM es de 10 a 40 $mg L^{-1}$. El modelo de pseudo-segundo orden describe de manera adecuada el comportamiento del proceso de adsorción. Por ello, se puede inferir que el mecanismo de adsorción es por quimisorción principalmente. Valores semejantes de la constante de velocidad de adsorción de pseudo-segundo orden fueron reportadas por Radoor et al. (2022), para 10 $mg L^{-1}$ de AM empleando películas amigables con el ambiente y de bajo costo de alcohol polivinílico, carboximetilcelulosa y cúrcuma, PVA/CMC/TUR (ver glosario), con $k_2 = 0.0069 \text{ mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$.

Como se puede observar, la constante cinética de difusión intra-partícula se incrementa con la concentración del colorante AM a adsorberse de 2.5 a 40 mg L⁻¹. Este comportamiento es similar para las tres temperaturas (293, 308, 323 K). No obstante, para cada concentración de colorante AM a las diferentes temperaturas (293, 308 y 323 K), a concentraciones de 10, 20 y 40 mg L⁻¹, la constante cinética de difusión intra-partícula decrece con el incremento de la temperatura.

Los modelos de isotermas de adsorción son importantes para diseñar procesos de adsorción y la optimización para el uso de adsorbentes. Los modelos de adsorción están basados en las propiedades del proceso de adsorción y en información de equilibrio químico del proceso, lo que depende de las condiciones fisicoquímicas de las interacciones que ocurren en el proceso. Para estudiar las propiedades de los adsorbentes se emplearon dos modelos: Freundlich (Ec. 6) y Langmuir (Ec. 7).

$$\ln(q_e) = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (6)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max}K_L} \frac{1}{C_e} \quad (7)$$

donde K_F es la constante de equilibrio de Freundlich, n es la constante de Freundlich, K_L es la constante de Langmuir, relacionada con la energía de adsorción y q_{max} es la capacidad máxima de adsorción. Los datos experimentales obtenidos a diferentes concentraciones de AM (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹) se ajustaron a los modelos de isotermas de adsorción de Langmuir, Ec. (7) y Freundlich, Ec. (6), para las tres temperaturas consideradas (293, 308 y 323 K). Los experimentos se llevaron a cabo a una concentración de BA-PA de 0.5 g L⁻¹ y pH de 7. En la Tabla 2 se presentan los parámetros de adsorción del ajuste a los modelos de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich. Los resultados demuestran un mejor ajuste al modelo de Langmuir. Esto indicaría que el proceso de adsorción del colorante AM sobre el bio-adsorbente BA-PA es una monocapa.

Tabla 2. Parámetros de adsorción para el adsorbente BA-PA

| T, K | Modelo de Langmuir | | | Modelo de Freundlich | | |
|------|----------------------|----------------|-------------|----------------------|--------------|-------------|
| | $q_{max}, mg g^{-1}$ | K_L, Lg^{-1} | R^2 | n | K_F | R^2 |
| 293 | 78.950±11.517 | 1.821±0.341 | 0.742±0.033 | 2.454±0.053 | 26.968±0.464 | 0.864±0.009 |
| 308 | 61.433±2.261 | 0.831±0.061 | 0.983±0.001 | 2.001±0.019 | 19.806±0.114 | 0.929±0.000 |
| 323 | 39.316±3.602 | 1.742±0.347 | 0.987±0.008 | 2.615±0.120 | 16.789±0.086 | 0.930±0.012 |

Los valores de q_{max} del BA-PA disminuyen con el incremento de la temperatura de 78.950±11.517, 61.433±2.261 y 39.316±3.602 para 293, 308 y 323 K, respectivamente. Además del parámetro q_{max} , es importante determinar si el proceso de adsorción es favorable. Esto puede lograrse mediante el factor de separación R_L (también denominado parámetro de equilibrio), dado por la Ec. (8):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_{AM,0}} \quad (8)$$

Si $0 < R_L < 1$, el proceso es favorable. Considerando el intervalo de concentraciones de AM (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹), para las tres temperaturas (293, 308 y 323 K), se tiene que $R_L < 1$ (0.999 a 0.931). Por tanto, el proceso de adsorción es favorable (Liu et al., 2019). Los autores Asiagwu et al. (2013) y Mallampati et al. (2015) reportaron un proceso de adsorción favorable utilizando semilla y piel de aguacate, con valores de R_L entre 0.999 a 0.931.

Para el modelo de Freundlich, K_F decrece con el incremento de temperatura de 293 a 323 K. Por otro lado, el valor de n está relacionado con la capacidad de adsorción. Para el proceso de adsorción, $n > 1$ (valores de 2.615 a 2.001), lo que indica que la adsorción es adecuada.

Parámetros termodinámicos de adsorción

El cambio de entalpía (ΔH^0), la energía libre de Gibbs (ΔG^0) y el cambio de entropía (ΔS^0) se evaluaron para la adsorción del colorante con el bio-adsorbente BA-PA, empleando las Ecs. (9) y (10)

$$\ln K = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (9)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (10)$$

donde R es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), $K = \rho \frac{q_E}{c_E}$ representa la constante de equilibrio termodinámico y T (K) es la temperatura absoluta a la que se realizó el experimento. Los valores de ΔH^0 y ΔS^0 se obtienen gráficamente de $\ln K$ vs. $1/T$, Ec. (9). El cálculo de ΔG^0 se realizó empleando el modelo representado por la Ec. (10).

Los datos experimentales obtenidos para cada concentración a la temperatura se ajustaron al modelo de la Ec. (9), para obtener los parámetros ΔH^0 y ΔS^0 . Este procedimiento se repite para cada concentración de AM de 2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L^{-1} . En la Tabla 3 se presentan los valores de los parámetros termodinámicos ΔH^0 y ΔS^0 . En la Figura 8 se muestra ΔG^0 como función de la temperatura para las concentraciones de AM consideradas.

Tabla 3. Parámetros termodinámicos de adsorción para el material adsorbente BA-PA

| AM, mg L^{-1} | ΔH^0 , kJ mol^{-1} | ΔS^0 , kJ mol^{-1} |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 2.5 | -15.481 ± 1.648 | 0.041 ± 0.005 |
| 5.0 | -35.314 ± 0.874 | -0.021 ± 0.003 |
| 10.0 | -40.172 ± 0.770 | -0.039 ± 0.003 |
| 20.0 | -26.398 ± 0.419 | -0.008 ± 0.001 |

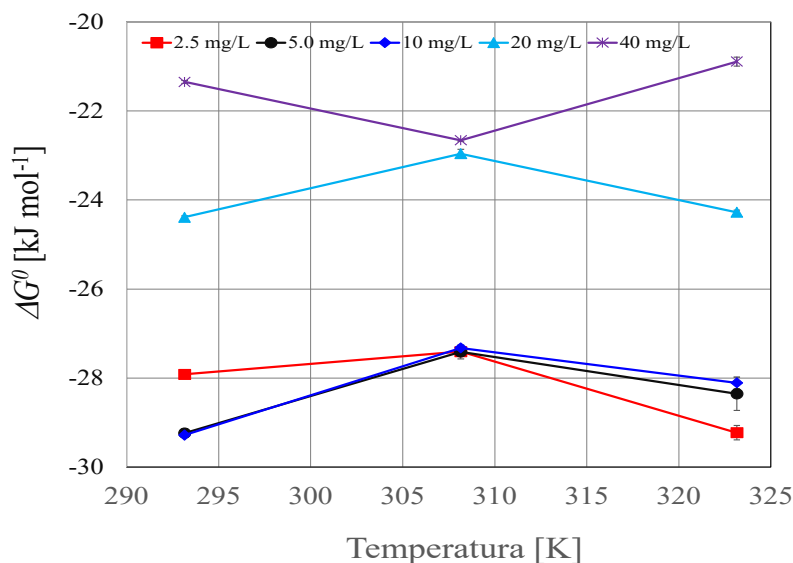


Figura 8. Energía libre de Gibbs, ΔG^0 , en función de la temperatura para las concentraciones de AM en estudio (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L^{-1})

El valor ΔH^0 es negativo para todas las concentraciones de AM indicando que el proceso es exotérmico, lo que implica fuertes interacciones químicas entre el material adsorbido y el material adsorbente, característico de procesos de adsorción por quimisorción. Estos resultados son coherentes con lo observado en la cinética de adsorción y el modelo de isoterma de adsorción. Para concentraciones de 5 a 40 mg L⁻¹ se obtienen valores negativos de la entropía, lo que está relacionado con un proceso poco reversible y que tiene cambios en la superficie del bio-adsorbente AM (Uddin y Nasar, 2020). En la Figura 8 se muestran los valores de la ΔG^0 en función de la temperatura para las diferentes concentraciones de AM. Para todos los casos el valor negativo indica que es un proceso espontáneo. Para 2.5, 5, 10 y 20 mg L⁻¹ se puede observar la disminución de los valores negativos de ΔG^0 con el aumento de la temperatura (308 a 323 K), indicando que ocurre un proceso irreversible, coherente con los valores de entropía. Las temperaturas por encima de 293 K desempeñan un papel desfavorable hacia la adsorción (Uddin y Nasar, 2020). Para 40 mg L⁻¹, este comportamiento se observa de 293 a 308 K.

Reutilización¹⁰

La aplicación del proceso de adsorción en la eliminación de contaminantes requiere que los bio-materiales sean estables en condiciones de funcionamiento y reutilización en varios ciclos continuos. En la Figura 9 se presentan los perfiles de remoción de colorante AM, para las diferentes concentraciones AM, durante la reutilización de BA-PA por ocho ciclos continuos. El estudio de reutilización se realizó durante ocho ciclos con un tiempo de contacto de 240 minutos cada uno. Los experimentos se llevaron a cabo con un valor de pH de 7, una concentración de BA-PA de 0.5 g L⁻¹ y a una temperatura de 293K. Al final del proceso de adsorción, el BA-PA se recuperó y se utilizó en el siguiente experimento. Este procedimiento se repitió para cada ciclo.

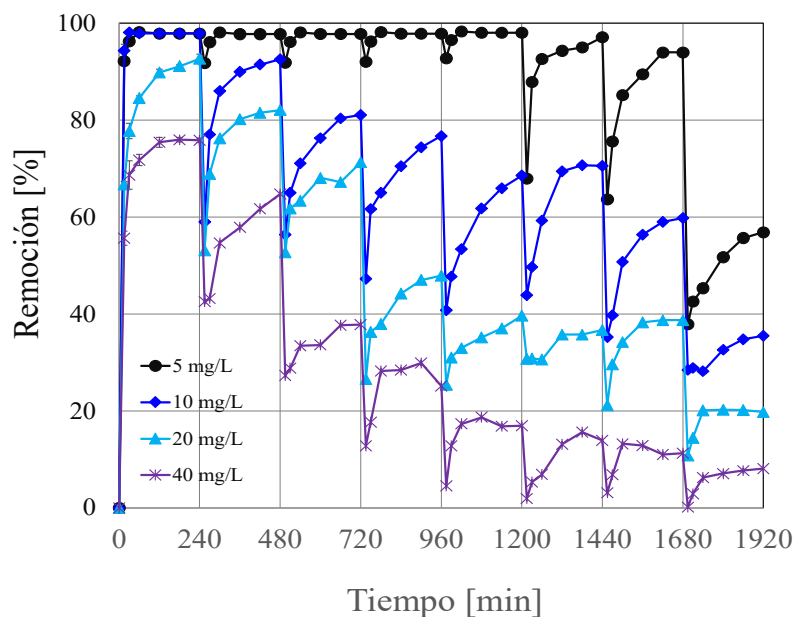


Figura 9. Perfiles de remoción de colorante AM, para las concentraciones de AM (5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹), para 8 ciclos continuos de reutilización

¹⁰ Ver el Glosario. Aviso: La palabra **usabilidad** no está en el Diccionario (<https://dle.rae.es/usabilidad?m=form>), como tampoco están las palabras que tuvieron a bien poner los diputados en las normas oficiales mexicanas de "reuso" de agua que, en todo caso debería haber sido "reúso" para romper el diptongo y pronunciarla correctamente [Nota de las(os) editoras(es)]

En la Figura 9 se puede observar que, al incrementar la concentración de AM, la saturación del BA-PA ocurre en los primeros ciclos de reutilización, lo que se puede atribuir a que la disponibilidad de sitios activos es cada vez menor. Un ejemplo de esto es lo que ocurre a 40 mg L^{-1} , donde la cantidad de colorante removido es menor a un 20% para los 4 últimos ciclos (del ciclo 5 al 8).

Comparación del BA-PA con un bio-adsorbente comercial

Con la finalidad de comparar el comportamiento del bioadsorbente BA-PA con uno comercial, se llevaron a cabo una serie de experimentos con un carbón activado comercial, CAC, a base de fibra de coco (FLEN-6066217). Los experimentos se realizaron a temperatura de 293 K, valor de pH de 7 y con una concentración de CAC de 0.5 g L^{-1} , variando la concentración del colorante que se va a adsorber (AM) de 2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L^{-1} . Los experimentos se llevaron a cabo por triplicado. En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos con el CAC.

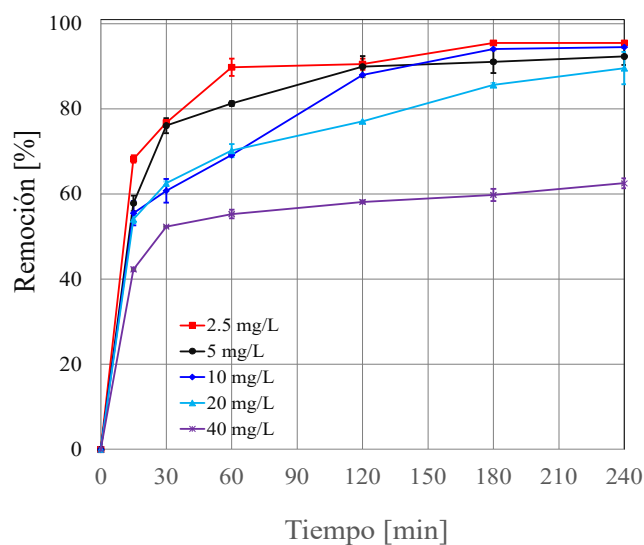


Figura 10. Perfiles de remoción de colorante modelo AM a diferentes concentraciones (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg L^{-1}), concentración de adsorbente modelo CAC de 0.5 g L^{-1} a la temperatura de 293 K y valor de pH de 7

Como se puede observar para concentraciones de 2.5 a 20 mg L^{-1} , los porcentajes de remoción del AM son similares con los obtenidos con el BA-PA (del orden de 90%). Para la concentración más alta de AM, 40 mg L^{-1} , la remoción alcanzada con CAC fue de 60% después de 4 horas de contacto y para BA-PA se alcanzó una remoción superior a 76% [ver Figura 7(a)].

Para materiales porosos, como el CAC, los procesos de transferencia de masa cobran mayor relevancia e influyen en el proceso de adsorción. Para el CAC, el proceso de adsorción fue más lento (ver Figura 10) comparado con el BA-PA [ver Figura 7(a)]. Esto se puede atribuir a la transferencia de AM en los poros de material para adsorberse sobre algún sitio activo.

Conclusiones

En esta investigación se sintetizó, caracterizó y aplicó un material bio-adsorbente obtenido a partir de residuos de piel de aguacate (BA-PA). El BA-PA tiene una estructura cristalina amorfa, cuya

composición es característica de un material compuesto por celulosa con grupos funcionales que favorecen el proceso de adsorción. El colorante AM se adsorbe eficazmente sobre el adsorbente a un valor de pH de 7, alcanzando porcentajes de remoción desde 78 hasta 99% para concentraciones de 40 a 2.5 mg L⁻¹, a temperaturas de 293 y 308 K. A temperatura de 323 K, la remoción decrece hasta un 60% para una concentración de AM de 40 mg L⁻¹.

El proceso de adsorción es descrito por un modelo de pseudo-segundo orden y el modelo de Langmuir, lo que indica que el proceso se lleva a cabo por quimisorción. El proceso de adsorción de AM es un proceso exotérmico y poco reversible. La reutilización del bio-adsorbente BA-PA es eficaz hasta 7 ciclos, para concentraciones de AM de 5 y 10 mg L⁻¹. Para concentraciones superiores a 10 mg L⁻¹, la eficacia en la remoción de colorante decrece con los ciclos de reutilización, ya que los sitios activos disponibles para adsorción disminuyen.

El aprovechamiento y la valorización para el desarrollo de biomateriales a partir de residuos de piel de aguacate representa una opción factible para la minimización de residuos agro-industriales. El bio-adsorbente de piel de aguacate, BA-PA, es un material que puede ser aplicado en la remoción de contaminantes orgánicos y/o elementos potencialmente tóxicos como se les llama ahora tanto a los metales pesados como a otros elementos que no tienen las características de los metales, como el arsénico (Pourret y Hursthouse, 2019).

Glosario

| Términos y siglas | Significado |
|--------------------|--|
| Adsorber | Del latín <i>ad</i> hacia y <i>sorbēre</i> sorber. Física y Química. Dicho de un cuerpo: Atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo. Participio pasado usado como adjetivo y en algunas ocasiones como sujeto, adsorbido ¹¹ (https://dle.rae.es/adsorber?m=form) |
| Agua DI | Agua desionizada (libre de iones) |
| AM | Colorante catiónico azul de metileno |
| BA-PA | Bio-adsorbente preparado a partir de piel de aguacate |
| Bio-adsorbentes | Materiales provenientes de biomasa que pueden o no ser activados por diferentes procesos químicos y térmicos. Los bio-adsorbentes naturales son aquellos que mantienen las características superficiales, no involucran el uso de agentes activantes ni procesos térmicos a alta temperatura (>600°C), por lo que resultan materiales de bajo costo |
| CAC | Carbón activado comercial hecho con fibra de coco |
| CONAHCYT | Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (México) |
| DGAPA | Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (México) |
| ICTI | Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación |
| IIM | Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM (México) |
| JCPDS | JCPDS 00-056-1718 (Por sus siglas en inglés, <i>Joint Committee of Powder Diffraction Standards</i>) |
| Lapso experimental | lapso ² . Del latín <i>lapsus</i> , deslizamiento, caída. 2. m. Tiempo entre dos límites. Sinónimos: intervalo, intersticio, hueco, período, etapa, plazo, tiempo, espacio (https://dle.rae.es/lapso?m=form) |
| LUME | Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (México) |
| PA | Polvo de tamaño de partícula >450 micrómetros (Orozco et al., 2024) obtenido por secado y molienda de piel de aguacate (<i>Persea americana</i>) |

¹¹ Aviso: La palabra **adsorbato** no está en el Diccionario (<https://dle.rae.es/adsorbato?m=form>)

| Términos y siglas | Significado |
|---------------------------|--|
| PAPIIT | Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación e Investigación Tecnológica de la DGAPA de la UNAM (México) |
| PICIR | Proyectos de Investigación Científica de Impacto Regional (México) |
| PIE | Punto isoelectrico: El procedimiento seguido incluyó el ajuste de pH inicial (pH_i) de una solución acuosa de KCl 0.1 M, la adición de 2 g L ⁻¹ de BA-PA manteniendo en agitación por 48 horas a temperatura ambiente y midiendo el pH final registrado como pH_f . El procedimiento se repitió para todos los valores de pH considerados (2, 4, 6, 8 y 10). El valor de pH en el PIE se obtiene al graficar el cambio ($\Delta pH = pH_f - pH_i$) como función del pH. El valor de pH en el PIE corresponde a la intersección de la curva con el origen (cero) |
| <i>PVA/CMC/TUR</i> | Abreviaturas en inglés para <i>Polyvinyl alcohol (PVA)</i> , <i>carboxymethyl cellulose (CMC)</i> y <i>Turmeric/curcumin</i> (Radoor et al., 2022) |
| <i>R</i> | Constante universal de los gases (8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹) |
| Reutilizar, reutilización | Volver a utilizar algo, bien con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines (https://dle.rae.es/reutilizar?m=form) |
| <i>SEM</i> | Siglas en inglés para microscopía electrónica de barrido (<i>Scanning Electron Microscope</i>). El microscopio electrónico de barrido es un tipo de microscopio electrónico capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Aplica un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen (Wikipedia) |
| <i>T</i> | Tiempo de experimentación para adsorber el AM en el bio-adsorbente |
| UNAM | Universidad Nacional Autónoma de México |
| Utilizar, utilización | Acción y efecto de utilizar. Sinónimos: uso, empleo (https://dle.rae.es/utilizaci%C3%B3n?m=form) |

Caracteres griegos

| | |
|--------------|---|
| ΔG^0 | Parámetro termodinámico: Energía libre de Gibbs |
| ΔH^0 | Parámetro termodinámico: Cambio de entalpía |
| ΔpH | Diferencia entre el valor de pH final (pH_f) y pH inicial (pH_i), $\Delta pH = pH_f - pH_i$ |
| ΔS^0 | Parámetro termodinámico: Cambio de entropía |

Reconocimientos

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, CONAHCYT, por la Beca de Consolidación M1 y M2 (I1200/320/2022-I1200/331/2023). El último autor reconoce el apoyo financiero de la UNAM-DGAPA-PAPIIT Proyecto IA103623, así como el apoyo del Proyecto ICTI-PICIR23-004. Los autores agradecen a Omar Novelo del LUME (IIM-UNAM) por la caracterización *SEM*.

Referencias

- Aguilar-Rosero, J., Urbina-López, M.E., Rodríguez-González, B.E., León-Villegas, S.X., Luna-Cruz, I.E., Cárdenas-Chávez, D.L. 2022. Development and characterization of bioadsorbents derived from different agricultural wastes for water reclamation: A review. *Applied Sciences*. 12(5):2740. doi.org/10.3390/app12052740
- Ahmad, T., Danish, M. 2022. A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. *Chemosphere*. 296 (134036). doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.

- Aichour, A., Zaghouane-Boudiaf, H., Viseras-Iborra, H. 2018. Bioadsorbent beads prepared from activated biomass/alginate for enhanced removal of cationic dye from water medium: Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*. 256:533-540. doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.797.
- Al-Gheethi, A.A., Azhar, Q.M., Kumar, P.S. 2022. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review. *Chemosphere* 287 (132080). doi.org/10.1016/j.chemosphere.
- Asiagwu, A., Omuku, C.P.E., Alisa, C.O. 2013. Kinetic model for the removal of methyl orange (dye) from aqueous solution using avocado pear (*Persea americana*) seed. *Journal of Chemical, Biological, and Physical Sciences*. 3:48 (57699)
- Asiagwu, A., Okposo, M.A., Peretomo-Clarke, M.A. 2017. Kinetic model for the removal of amaranth dye from aqueous solution using avocado pear seed as biomass. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics*. 5:119 (123702)
- Besegatto, S.V., Martins, M.L., Lopes, T.J. 2021. Multivariate calibration as a tool for resolution of color from mandarin peel and dyes in aqueous solution for bioadsorption studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9 (104605). doi.org/10.1016/j.jece.2020.104605726
- Berrazoum, A., Marouf, R., Ouadjenia, F. 2015. Bioadsorption of a reactive dye from aqueous solution by municipal solid waste. *Biotechnology Reports*. 7(44-50). doi.org/10.1016/j.btre.2015.04.005
- Cheng, S., Zhang, L., Xia, H. 2017. Adsorption behavior of methylene blue onto waste derived adsorbent and exhaust gases recycling. *Royal Society of Chemistry: Advances*. 7 (27331). doi.org/10.1039/C7RA01482A
- Costa, M.E.G., da-Costa-Assunção, F.P., Teribele, T., Pereira, L.M., de-Castro, D.A.R., Santo, M.C., da Costa, C.E.F., Shultze, M., Hofmann, T., Machado, N.T. 2021. Characterization of bio-adsorbents produced by hydrothermal carbonization of corn stover: Application on the adsorption of acetic acid from aqueous solutions. *Energies*. 14 (8154). doi.org/10.3390/en14238154
- Enahoro-Agarry, S. 2016. Anthracene bioadsorption from simulated wastewater by chemically-treated unripe plantain peel bioadsorbent: Batch kinetics and isothermal modeling studies. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 39. doi.org/10.1080/10406638.2016.1255650
- Ishikawa, M., Oaki, Y., Tanaka, Y. 2015. Fabrication of nanocellulose-hydroxyapatite composites and their application as water-resistant transparent coatings. *Journal of Materials Chemistry*. 3 (5858). doi.org/10.1039/c5tb00927h
- Liu, Z., Huang, X., Miao, Y., Gao, B., Shi, Y., Zhao, J., Tan, S.H. 2022. Eggplant biomass based porous carbon for fast and efficient dye adsorption from wastewater. *Industrial Crops and Products*. 187 B (115510). doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115510805
- Liu, Q.-X., Zhou, Y.-R., Wang, M., Zhang, Q., Ji, T., Chen, T.-Y., Yu, D.-C. 2019. Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto viscose-based activated carbon fiber felts: Kinetics and equilibrium studies. *Adsorption Science & Technology*. 37(3-4):312-332. doi: 10.1177/0263617419827437.
- Mallampati, R., Xuanjun, L., Adin, A. 2015. Fruit peels as efficient renewable adsorbents for removal of dissolved heavy metals and dyes from water. *American Chemical Society. Sustainable Chemistry & Engineering*. 3 (1117-1124). doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00207
- Mokhtari, A., Sabzi, M., Azimi, H. 2021. 3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye. *Carbohydrate Polymers*. 265 (118075). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118075>
- Nguyen Hoc Thang, Dinh-Sy Khang, Tran-Duy Hai, Dinh Thi Nga, Phan Dinh Tuan. 2021. Methylene blue adsorption mechanism of activated carbon synthesised from cashew nut shells. *Royal Society of Chemistry Advances*. 11 (26563)
- Orozco, S., Montiel, E., Espino-Valencia, J., Guerra González, R., Chávez Parga, M.C., Apolinar-Cortés, J., Rivero, M. 2024. Effective RhB dye removal using sustainable natural bioadsorbents synthesized from avocado seed and skin. Submitted to *Water, Air, & Soil Pollution Journal: WATE-D-23-01491R1*
- Paniagua, S., Reyes, S., Lima, F. 2021. Combustion of avocado crop residues: Effect of crop variety and nature of nutrients. *Fuel* 291 (119660). doi.org/10.1016/j.fuel.2020.11966
- Pereira, J.E., Ferreira, R.L., Nascimento, P.F. 2021. Valorization of carnauba straw and cashew leaf as bioadsorbents to remove copper (ii) ions from aqueous solution. *Environmental Technology & Innovation* 23 (1017069) doi.org/10.1016/j.eti.2021.101706
- Pourret, O., Hursthouse, A. 2019. It's time to replace the term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" when reporting environmental research. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6887782/>
- Radoor, S., Karayil, J., Jayakumar, A., Parameswaranpillai, J., Lee, J., Siengchin, S. 2022. Ecofriendly and low-cost bio adsorbent for efficient removal of methylene blue from aqueous solution. *Scientific Reports*. 12(20580). doi.org/10.1038/s41598-022-22936-0
- Sahu, O., Singh, N. 2019. Significance of bioadsorption process on textile industry wastewater. In: *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology. The Textile Institute Book Series* (367-416). doi.org/10.1016/B978-0-08-102491-1.00013-7
- Uddin, M.K., Nasar, A. 2020. Walnut shell powder as a low-cost adsorbent for methylene blue dye: Isotherm, kinetics, thermodynamic, desorption, and response surface methodology examinations. *Scientific Reports*. 10 (7983). doi.org/10.1038/s41598-020-64745-3
- Wang, L., Shi, C., Wang, L., Pan, L., Zhang, X., Zou, J.-J. 2020. Rational design, synthesis, adsorption principles and applications of metal oxide adsorbents: A review. *Nanoscale*. 12 (4790-4815). doi.org/10.1039/C9NR09274A892
- World Avocado Map 2023. Global Growth Far From Over. 2023 Rabbabank. <https://research.rabobank.com/far/en/sectors/fresh-produce/world-avocado-map-2023-global-growth-far-from-over.html>
- Yadav, A., Bagotia, N., Yadav, S. 2022. Environmental application of *Saccharum munja* biomass-derived hybrid composite for the simultaneous removal of cationic and anionic dyes and remediation of dye polluted water: A step towards pilot-scale studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 650 (129539). doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129539901