



Materiales a partir de residuos agroindustriales de aguacate para la remoción de contaminantes en agua

Sayra Orozco¹, Jaime Espino¹, Michel Rivero²

¹ Posgrado en Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

² Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia – UNAM

sayra.orozco@umich.mx

mrivero@materiales.unam.mx

Resumen

La agroindustrialización del aguacate ha traído consigo grandes retos y uno de estos es el manejo integral de residuos de piel y semilla de aguacate. El aprovechamiento y la valorización de los subproductos de la piel y semilla de aguacate es factible para el desarrollo de productos, como por ejemplo, los bioadsorbentes. En este trabajo se recupera y recicla la semilla y piel de aguacate para el desarrollo de bioadsorbentes naturales (sin aditivos y de bajo consumo energético) y activados (empleando agentes activantes y altas temperaturas). Los bioadsorbentes sintetizados se aplicaron para la remoción de un colorante modelo (RdB), bajo condiciones óptimas. El empleo de bioadsorbentes a partir de piel y semilla de aguacate resultó eficaz para la remoción de rodamina B, alcanzando un 95 % con el bioadsorbente natural y con el activado, después de 240 min.

Palabras clave

Contaminantes emergentes; Salud; Remediación ambiental; Bioadsorbentes.

Industrialización del aguacate

El aguacate "*Persea americana*" es una fruta típica mexicana con propiedades nutricionales excepcionales. En 2023, la producción mundial de aguacate fue de 1.4 millones de toneladas con un mercado mundial de 16 mil millones de dólares, y se estima que crecerá a una tasa anual de 7.2 % hasta el 2030 [MAR, 2023]. México es el mayor productor de aguacate en el mundo, con 2.393 millones de toneladas [Shahbandeh, 2022] y el mayor centro de producción es Michoacán. En los últimos años, el aguacate se ha considerado como un superalimento debido a sus múltiples propiedades nutricionales. Para satisfacer las necesidades de los consumidores e incorporar este fruto

en los nuevos estilos de alimentación, la agroindustrialización de este fruto se ha expandido para el desarrollo de nuevos productos como guacamole, rebanadas de fruto congeladas, salsas, puré, deshidratado y aceite de aguacate, entre otros productos.

En el procesado del aguacate, las semillas y la piel se consideran subproductos de desecho y, por tanto, se descartan. De acuerdo con Rodríguez-Martínez y col. (2022), en 2019 se generaron alrededor de 2 millones de toneladas de semillas y piel de aguacate a nivel mundial. Esto hace necesaria la recuperación y valorización de estos subproductos, ya que de lo contrario podrían constituir una problemática de contaminación debida a una gestión inadecuada. En México, en el marco de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de Residuos [LGPGIR, 2023] y de la Ley General de Economía Circular [LGEC, 2019], el aprovechamiento y la valorización de residuos de piel y semilla de aguacate constituyen una estrategia para la gestión integral de residuos, que aporta beneficios económicos y ambientales.



Figura 1. Aprovechamiento y valorización de la piel y semilla de aguacate

La semilla y la cáscara del aguacate representan un porcentaje significativo del fruto, de un 13-17 %, lo que equivale a una generación de 311 a 406 mil toneladas anuales, solo en México. La piel y semilla del aguacate contienen macromoléculas como polisacáridos, proteínas, lípidos, minerales y vitaminas, por lo que estos subproductos podrían ser aprovechados y valorizados para el desarrollo bioproductos como biocombustibles, aceites, bocadillos, productos farmacéuticos y biomateriales, como se esquematiza en la Figura 1.

Bioadsorbentes a partir de piel y semilla de aguacate

Por biomateriales nos referimos a aquellos materiales que son obtenidos a partir de recursos biomásicos, que pueden ser empleados como matrices o adsorbentes. Los adsorbentes derivados de biomasa se les denominan **bioadsorbentes**, que pueden o no ser activados por diferentes procesos químicos y térmicos. Los bioadsorbentes naturales son aquellos que mantienen las características superficiales, no involucran el uso de agentes activantes ni procesos térmicos a alta temperatura (mayores a 600 °C), por lo que resultan materiales de bajo costo. Por el contrario, en los bioadsorbentes activados se funcionaliza la superficie mediante procesos térmicos y químicos.

El desarrollo de bioadsorbentes a partir de semilla y piel de aguacate (u otros residuos como el mango) son una alternativa eficaz para la remoción de contaminantes orgánicos y metales pesados presentes en agua y suelo, así como para la remoción de gases no deseables en algunos sistemas. Los procesos de remoción de contaminantes se llevan a cabo mediante un proceso que se conoce como **adsorción/bioadsorción**.

La adsorción y bioadsorción son procesos fisicoquímicos que involucran la transferencia de una molécula en fase líquida o gaseosa, llamado adsorbato, a la superficie de un sólido, conocido como *adsorbente*. De forma general, el proceso de adsorción en la remoción de un contaminante se basa en la unión del contaminante (colorantes, fármacos, entre otros) sobre el adsorbente (minerales como zeolita, carbón activado, sílice, alúmina, entre otros) o bioadsorbentes (microorganismos y recursos biomásicos), como se ilustra en la Figura 2. La eficacia del proceso de adsorción depende de las propiedades del adsorbente (tamaño y forma del poro, área superficial), del adsorbato (naturaleza, ionización/carga eléctrica del adsorbato), así como de las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso (pH, temperatura, concentraciones de adsorbato y adsorbente). Adicionalmente, cuando en el efluente están presentes distintos tipos de adsorbatos, existirá una competencia entre ellos para adsorberse en el material. Es importante resaltar que el proceso de adsorción/bioadsorción solo **transfiere** el contaminante a otra fase (del agua contaminada al material adsorbente), sin que el contaminante sufra alguna modificación en su estructura química. Es decir, el problema de contaminación persiste en el adsorbente, que debe ser removido para un proceso posterior. En este caso, el adsorbente usado puede ser almacenado, puede recibir un tratamiento posterior (pirólisis), o bien ser reutilizado por varios ciclos, aunque el procesamiento final dependerá del tipo de contaminante en cuestión.

Para demostrar la eficacia de los bioadsorbentes en la remoción de contaminantes, a continuación, se describe de manera general el uso de un bioadsorbente natural y

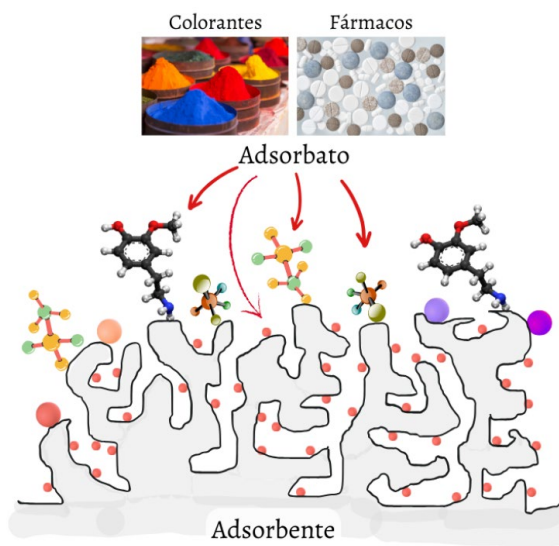


Figura 2. Proceso de adsorción/bioadsorción

activado derivado de residuos de aguacate para la remoción de un colorante modelo, Rodamina B (RdB).

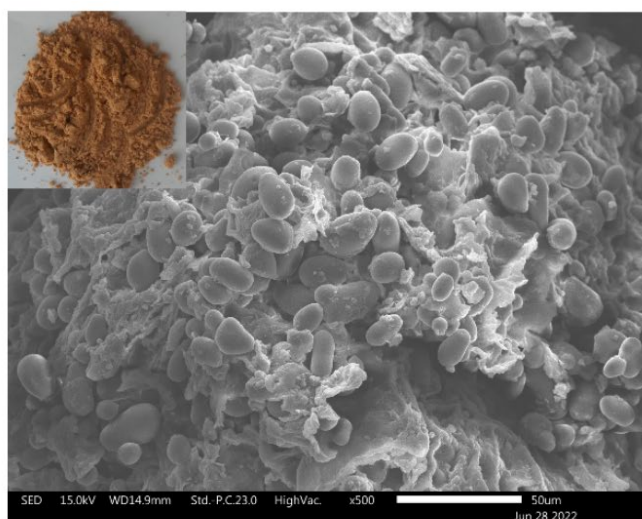
Bioadsorbentes para la remoción de contaminantes en agua

Los biomateriales derivados de residuos biomásicos poseen una gran variedad de grupos funcionales ($-OH$, $-C=O$, $-CO$), lo que facilita su uso como bioadsorbentes. Adicionalmente, con el uso de biomateriales transitamos hacia una economía circular, en la que residuos agrícolas son recolectados, recuperados, reciclados y valorizados, por lo que constituyen una alternativa económico-ambiental viable. Y si, además, los procesos se llevan a cabo a temperaturas bajas (menores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), se podría pensar en la incorporación de sistemas solares, que implican beneficios adicionales. Para estudiar el proceso de remoción de colorante mediante el proceso de bioadsorción se han desarrollado un bioadsorbente natural y uno activado, a partir de residuos de semilla y piel de aguacate. La semilla y la piel de aguacate fue recuperada y reciclada por procesos mecánicos y físicos para formar polvos con tamaño medio de partículas de

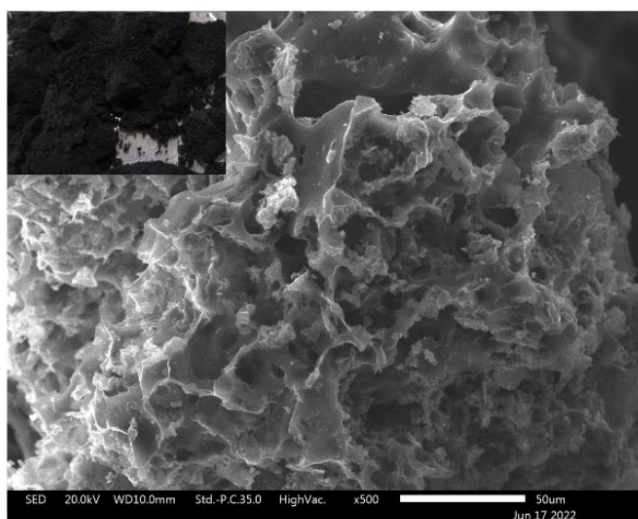
450 μm , y después fueron tratados por dos métodos para la síntesis del bioadsorbente natural (BAN) y activado (BAA).

Para el BAN, el polvo (la mezcla de la piel y semilla de aguacate) fue sometido a un proceso hidrotérmico en condiciones ácidas y a una temperatura de 35 °C, por 3 horas. Posteriormente, se secó a 50 °C por 24 horas. Como se observa en la Figura 3(a), el BAN tiene una morfología de esferas irregulares no porosas cuyas dimensiones oscilan entre 15 y 17 μm y un área superficial de 0.91 m^2/g . Por otro lado, el BAA fue sintetizado por un proceso pirolítico. El agente activante (ZnCl_2) fue añadido a la mezcla de polvo de piel y semilla de aguacate, la mezcla fue sometida a 650 °C por 3 horas en condiciones de vacío. El BAA es un material poroso (con tamaños de poro de varias decenas de nanómetros, como se observa en la Figura 3(b)) y su área superficial es de 620 m^2/g , es decir, tiene aproximadamente 680 veces el área del BAN. Cabe destacar que en solo 10 g de BAA se tendría un área equivalente a la de un campo de fútbol profesional.

Los bioadsorbentes BAN y BAA fueron empleados para la remoción del colorante Rodamina B (RdB), en condiciones experimentales óptimas [Orozco y col. 2023]. El colorante RdB es una molécula compleja, ampliamente utilizada en la industria textil y del teñido y es de carácter no biodegradable [Bazan-Wozniak y col., 2023]. En la Figura 4(a) se muestra la evolución del proceso de remoción de la RdB con una concentración inicial de 12 mg/L, para ambos bioadsorbentes. Se puede observar que después de 240 min. (4 h) se removió el 94.5 y 95.5 % del colorante presente en el agua para los bioadsorbentes BAN y BAA, respectivamente. En este caso, la RdB se adsorbe sobre la superficie de BAN por interacción electrostática de entre el grupo amino (NH_2^+) del colorante y los grupos hidroxilo (HO^-) presentes en los bioadsorbentes. Para BAA, el proceso de adsorción ocurre por las interacciones entre los grupos funcionales que están presentes en el BAA (hidroxilo -OH, carboxilo -COOH, carbonilo -C=O, éter -O-, amina -NH₂, lactona -O=C=O, quinona -C=O-, entre otros) y las formas ionizadas del colo-



(a)



(b)

Figura 3 Morfología de los materiales para remediación ambiental (a) BAN y (b) BAA

rante RdB (amino NH_2 y carboxilo $-\text{COOH}$). En este punto es importante resaltar que, aunque con ambos materiales se obtuvo una remoción similar, la curva de remoción en ambos casos es distinta. Para el BAN, el proceso de adsorción ocurre principalmente en la superficie externa del material y en los primeros 15 minutos se alcanza aproximadamente el 80 % de remoción. Para el BAA sólo se alcanza el 60%, que se puede atribuir a que el proceso de adsorción se lleva a cabo en la superficie interna (poros del material) y externa, afectando la dinámica de adsorción por los grandes retos en la transferencia del adsorbato hacia el adsorbente.

En la Figura 4(b) se presentan muestras del BAN antes (ver Fig. 4(b.1)) y después del proceso de adsorción (ver Fig. 4(b.2)). Como se puede observar, el BAN cambia de color de marrón a rojo, debido a las moléculas del colorante adsorbidas.

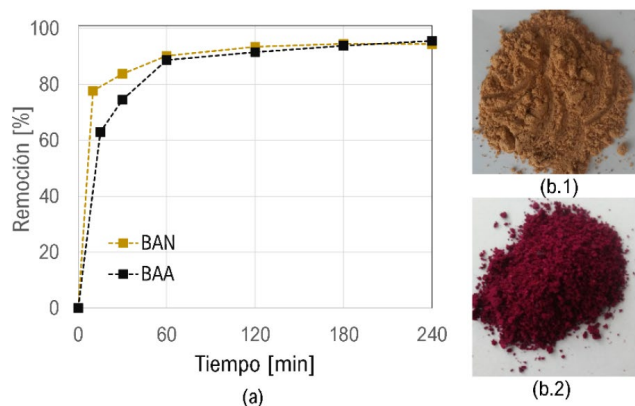


Figura 4. Perfiles de remoción por bioadsorción de la RdB sobre BAN y BAA, y (b) Comparación del BAN inicial y BAN usado

Comentarios finales

La recuperación y valorización de los subproductos resultantes del procesamiento del aguacate por enfoques sostenibles permiten convertir estos residuos en productos de alto valor, reduciendo su acumulación,

eliminación y problemas medioambientales. El reciclado de la semilla y la piel de aguacate es viable en términos económicos y ambientales. El uso de bioadsorbentes es un método eficaz para la remoción de contaminantes presentes en el agua. Estos contaminantes quedan atrapados en el bioadsorbente y estos pueden ser eliminados por procesos térmicos o químicos. El proceso de bioadsorción es una alternativa de bajo impacto ambiental debido a que en la síntesis de los bioadsorbentes se pueden integrar tecnologías renovables, lo que está en investigación actualmente.

Bibliografía

1. Market Analysis Report (2023) Avocado market size, share & trends analysis report and segment forecasts, 2023–2030. Disponible en <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fresh-avocado-market-report>
2. Shahbandeh M (2022) Global avocado production 2000–2020. Statista Research Department <https://www.statista.com/statistics/577455/world-avocado-production/>
3. Rodríguez-Martínez B, Román A, Eibes G, et al (2022) Potential and prospects for utilization of avocado by-products in integrated biorefineries. *Bioresour Technol* 364:128034. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128034>
4. Ley para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, 2023. Disponible en <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
5. Ley General de Economía Circular, 2019. Disponible en https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_del_senado/documento/101326
6. Orozco Sayra, Montiel Esteban, Espino Valencia Jaime, Guerra González Roberto, Chávez Parga María del Carmen, Apolinar Cortés José, Rivero Michel. 2023. Effective RhB dye removal using sustainable natural bioadsorbents synthesized from avocado seed and skin. En revision: WATE-D-23-01491
7. Bazan-Wozniak Aleksandra, Nosal-Wierciński Agnieszka, Yilmaz Selehattin, Pietrzak Robert. 2023. Low-rank coals as precursors of effective carbonaceous adsorbents for the removal of Rhodamine B. *Journal of Molecular Liquids* (389):122949 <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122949>