

Polanco-Gamboa, D.M., Abatal, M., Tamayo-Ordoñez, F.A., Vázquez –Sánchez, A.Y. 2025. El Sargazo: de una Problemática Ambiental a un Biosorbente Potencial para la Remoción de Colorantes en Agua, p. 231-250. En: J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202511.

El Sargazo: de una Problemática Ambiental a un Biosorbente Potencial para la Remoción de Colorantes en Agua

*D. M. Polanco-Gamboa¹, M. Abatal¹,
F. A. Tamayo-Ordoñez², A. Y. Vázquez –Sánchez³*

¹Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Carmen

²Facultad de Química
Universidad Autónoma del Carmen

³Área Agroindustrial Alimentaria
Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez

Resumen

Desde hace más de una década, las grandes cantidades de sargazo que arriban a las costas de países de todo el mundo presentan un riesgo al medio ambiente. El sargazo tiene que ser removido de las playas, por lo tanto, existe una necesidad de aprovechar este biomaterial. Las aguas residuales cargadas con colorantes representan otra problemática ambiental importante, ya que afectan la integridad de los ecosistemas acuáticos y presentan un riesgo a la salud humana. En este trabajo, se presenta una revisión de la aplicación de diferentes especies de algas pardas (sargazo) para la remoción de dos colorantes de diferente naturaleza química, el azul de metileno y rojo Congo. Se encontró que las diferentes especies de sargazo remueven más del 90 % de los colorantes y se obtuvieron capacidades de adsorción más altas que otros biosorbentes. Adicionalmente, se discute el efecto que tienen los parámetros como el pH de la solución acuosa, tiempo de contacto (modelos cinéticos de adsorción), dosis de alga, temperatura y concentración inicial en la adsorción de los colorantes (modelos de isotermas de adsorción). Los intervalos de los parámetros experimentales para lograr máximas capacidades de adsorción del azul de metileno ($Q_{\max} = 863 \text{ mg g}^{-1}$) y del rojo Congo ($Q_{\max} = 28 \text{ mg g}^{-1}$) fueron los siguientes: dosis baja de alga ($1\text{-}2 \text{ g L}^{-1}$), tiempos cortos de contacto (30-240 min), valores de pH cercanos a la neutralidad (5-7), temperaturas bajas (20-30 °C). Las diferentes interacciones entre la superficie de las algas y las moléculas de los colorantes demuestran el alto potencial que tiene el sargazo para la remoción de colorantes catiónicos y aniónicos disueltos en agua.

Palabras clave: Sargazo, colorantes, alga parda, biosorbente, biosorción.

Abstract

Over the past decade, the large amounts of Sargasso washing up on coastlines worldwide have posed an environmental threat. Clearing Sargasso from beaches is necessary, and there's potential to utilize this biomaterial. Another significant environmental issue is the presence of dyes in wastewater, which harms aquatic ecosystems and human health. This review explores the use of different species of brown algae (Sargasso) for removing two different dyes, methylene blue and Congo red. The study found that various Sargasso species removed over 90% of the dyes and had higher adsorption capacities compared to other bio sorbents. The review also discusses the impact of parameters such as pH, contact time, algae dose, temperature, and initial concentration on dye adsorption. The optimal experimental parameter ranges for achieving maximum adsorption capacities of methylene blue ($Q_{\max} = 863 \text{ mg g}^{-1}$) and Congo red ($Q_{\max} = 28 \text{ mg g}^{-1}$) were low algae dose ($1\text{-}2 \text{ g L}^{-1}$), short contact times (30-240 min), near-neutral pH values (5-7), and low temperatures (20-30 °C). The interactions between the algae surface and dye molecules demonstrate the high potential of Sargasso for removing cationic and anionic dyes from water.

Keywords: Sargasso, Dyes, Brown algae, Bio sorbent, Bio sorption.

Introducción

La contaminación por colorantes sintéticos es una problemática ambiental actual, debido a que son utilizados por diferentes industrias; como, por ejemplo, textil, papelería, colorantes, farmacéutica, industrias de curtiduría, pintura y alimentaria, lo que genera grandes cantidades de aguas residuales cargadas con colorantes. La problemática radica en que, pequeñas cantidades de colorantes en el agua, en un rango de 10 a 50 mg L⁻¹ son suficientes para ser visible y afectar la transparencia y la solubilidad de gases en los cuerpos de agua (Wong & Yu, 1999). La principal afectación de la pérdida de transparencia y la baja solubilidad del oxígeno atmosférico provoca la disminución de oxígeno disuelto y afecta la capacidad fotosintética de las plantas (Hernández *et al.*, 2020). Además del impacto ecológico, algunos colorantes son altamente tóxicos, cancerígenos, y mutagénicos (Khan *et al.*, 2018; Kumari *et al.*, 2018) presentando una amenaza a la salud humana.

Por otro lado, la llegada de sargazo a las costas de países en todo el Mundo, también representa una importante problemática ambiental, ya que toneladas de estas algas marinas flotan en el mar por medio de vesículas denominadas aerocistos, además, se caracterizan por reproducirse principalmente de manera asexual, este tipo de reproducción permite incrementar su biomasa de manera exponencial, a medida que se incrementan los nutrientes en el medio en el que se encuentran (Ortegón Aznar & Ávila Mosqueda, 2020).

El sargazo pertenece a la clasificación de algas pardas o marrones, la clase *Phaeophyta*.

La abundancia del sargazo provoca afectaciones a nivel económico, ambiental y a la salud humana. Con respecto a la salud humana, durante la descomposición del sargazo se producen malos olores, proliferan bacterias, también se generan compuestos químicos, como el ácido sulfhídrico (H₂S), que pueden llegar a inducir a problemas de salud, afectando los sistemas nerviosos, respiratorio, muscular y circulatorio. Además, desde la perspectiva económica, los turistas perciben el sargazo como basura que disminuye la belleza escénica del paisaje. Esto ha ocasionado pérdidas económicas importantes para el turismo en México, Cuba y de varios países de Las Antillas (Rodríguez *et al.*, 2017). Desde el punto de vista ambiental, los grandes volúmenes flotantes de sargazo limitan el paso de luz hacia el fondo marino.

Además, por su alto contenido de nutrientes, el sargazo produce eutrofización del agua, que se define como el aumento de material orgánico debido al aporte de fósforo y nitrógeno (Le Moal *et al.*, 2019), el exceso de nutrientes induce cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua y propicia el crecimiento de microalgas que afectan ecosistemas sensibles, como por ejemplo los arrecifes de coral (Rodríguez *et al.*, 2019).

La abundancia de sargazo ha conducido a la investigación de aplicaciones potenciales de esta biomasa. En este trabajo, se presenta una clasificación de los colorantes y de las algas marinas. El principal objetivo de esta investigación es recapitular las aplicaciones de diferentes especies de algas marinas para la remoción de dos colorantes diferentes: aniónico y catiónico, rojo Congo y azul de

metileno, respectivamente, en medio acuoso mediante el proceso físico de adsorción. Se seleccionó el azul de metileno y el rojo Congo debido a que ambos colorantes presentan diferentes estructuras químicas, además, el azul de metileno es un colorante catiónico con múltiples aplicaciones a nivel industrial, mientras que, el colorante aniónico, rojo Congo es principalmente utilizado en histología para tinción de células, por lo que la generación continua de efluentes residuales cargados con estos colorantes presenta un riesgo al medio ambiente y a la salud humana, conduciendo a la necesidad del tratamiento de dichos efluentes. Se busca determinar la eficiencia del sargazo en la remoción de los dos colorantes y comparar sus máxi-

mas capacidades de adsorción. También, se discuten los efectos de los parámetros, como el pH, la concentración inicial del colorante, tiempo de contacto, la temperatura, y la dosis de biomasa utilizada en la eliminación de los colorantes. El estudio de los parámetros mencionados anteriormente es muy útil para saber las condiciones óptimas para la remoción de los colorantes y también proporciona información importante sobre el comportamiento de la adsorción de los colorantes sobre las algas. Finalmente, se presenta una comparación de la capacidad de remoción del sargazo con otros tipos de adsorbentes que se han utilizado para remover los colorantes.

Métodos y técnicas de investigación

En esta sección se presenta una descripción de los colorantes, su clasificación y sus efectos al medio ambiente y a la salud humana. Adicionalmente, se menciona las algas marinas y su clasificación.

Clasificación de los colorantes

La estructura química de los colorantes consta de dos componentes principales: los cromóforos, quienes son los responsables de producir el color y los auxocromos, quienes intensifican la afinidad de los colorantes a las fibras. Existen demasiados colorantes en el mercado, un colorante con la misma fórmula molecular puede tener diferentes aplicaciones, desde el teñido de fibras hasta en la producción de alimentos. Los colorantes se pueden clasificar de acuerdo con el grupo cromóforo presente en su molécula (tam-

bién conocida como clasificación química), la manera en la que se adhieren a las fibras y finalmente en si son solubles o no en agua (Sharma *et al.*, 2021). En este capítulo nos enfocaremos en los colorantes solubles en agua, principalmente los colorantes ácidos (aniónicos) y a los colorantes básicos (catiónicos) debido a que son la principal amenaza ambiental para los cuerpos de agua y las especies que viven en los ecosistemas acuáticos, además que su inclusión en la cadena trófica puede perjudicar la salud humana.

Colorantes ácidos o aniónicos

En su estructura tienen uno o más grupos ácidos como: SO_3H , CO_2H , NO_2 . Además, presentan una carga negativa (anión) en su estructura. Su naturaleza ácida explica su afinidad por grupos básicos presentes en las

fibras, como el algodón, la lana y el nylon (Salleh *et al.*, 2011). Los colorantes ácidos se encuentran el 30 y 40 % de los colorantes más usados (Sharma *et al.*, 2021). Como ejemplo de estos colorantes podemos incluir a los que contienen los siguientes grupos cromóforos en su molécula: azoicos, antraquinona, trifenilmetano, nitro (Salleh *et al.*, 2011), xantenos, triarilmetano y difenilamina (Sharma *et al.*, 2021).

El rojo Congo (RC) es un colorante ácido que pertenece al grupo de los colorantes azoicos. Los colorantes azoicos presentan en su molécula dos Nitrógeno unidos por doble enlace (figura 1). El RC se utiliza ampliamente en la industria textil debido a que puede formar fácilmente complejos con polisacáridos como la celulosa ((Wekoye *et al.*, 2020) (Csillag *et al.*, 2023)). Otra aplicación del rojo Congo es en histología, identificando proteínas amiloides en tejidos para diagnosticar amiloidosis (Tarek & Saleem, 1988).

El problema de los colorantes azoicos es su toxicidad; cuando se degradan en condiciones anaeróbicas se forma bencidina, un carcinógeno conocido. Por lo tanto, la bencidina es un subproducto de la degradación del RC que puede causar cáncer de vejiga en humanos (Xue-Yun *et al.*, 1990). Además de su efecto cancerígeno, los colorantes azoicos tienen otros efectos tóxicos que pueden afectar la salud humana al dañar órganos como la piel, los riñones, el hígado e incluso el sistema nervioso central. (Leudjo *et al.*, 2020).

Colorantes básicos o catiónicos

Su molécula consiste en anillos aromáticos que están sustituidos por diferentes elementos como: Azufre, Oxígeno y Nitrógeno. Adicionalmente presentan una carga positiva (catión) atribuida a complejos de sales de cloruro, y que con frecuencia forma parte integral de su estructura química (Herbst *et al.*, 2004). El principal distintivo de los colorantes básicos es que producen tonalidades

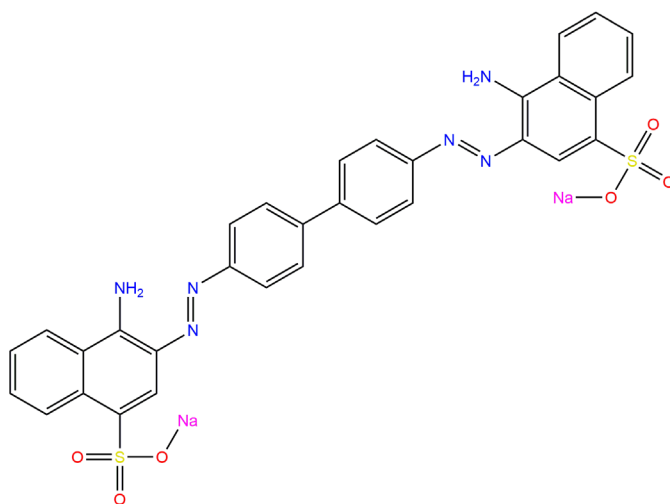


Figura 1. Colorante azoico rojo Congo.

muy intensas y brillosas, que no son iguales por otra clase de colorantes (Sharma *et al.*, 2021). Los grupos cromóforos que podemos encontrar en los colorantes básicos son: tiazina, azina, oxazina, difenilmetano, entre otros (Roy, 2011).

El azul de metileno (figura 2) es un colorante catiónico que se emplea tanto como sal doble de cloruro de Zinc o como cloruro simple, tiene múltiples aplicaciones entre ellas en medicina como inyectable para combatir la cianosis, como antiséptico de heridas, como indicador en reacciones óxido-reducción y para tinciones biológicas

(Rahimian & Zarinabadi, 2020). La exposición aguda al azul de metileno puede causar aumento de la frecuencia cardíaca, shock, vómitos, cianosis, ictericia, cuadriplejía, formación de cuerpos de Heinz y necrosis tisular en humanos (Salleh *et al.*, 2011).

Clasificación de las algas marinas

El término “Algas marinas” tradicionalmente se refiere a grandes organismos multicelulares similares a plantas que habitan principalmente en ambientes marinos, en aguas costeras y estuarinas en todo el mundo.

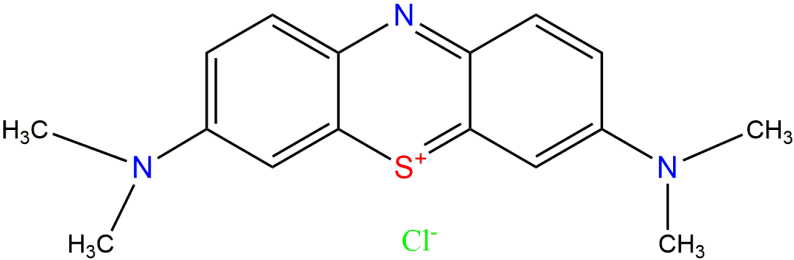


Figura 2. Colorante catiónico azul de metileno.

Tabla 1. Clasificación de las algas marinas (Davis <i>et al.</i> , 2003).				
División (Nombre Común)	Pigmentos	Producto de almacenamiento	Pared celular	Flagelo
<i>Phaeophyta</i> (Alga parda)	Clorofila a y c β-caroteno Fucoxantina Xantofilas	Laminarina (β -1,3- glucopiranosido) Manitol	Celulosa Ácido algínico Mucopolisacáridos sulfatados (fucoidan)	Presente
<i>Chlorophyta</i> (Alga verde)	Clorofila b y a α, β y γ-carotenos Xantofilas	Almidón (amilosa y amilopectina) Aceite		Presente
<i>Rhodophyta</i> (Alga roja)	Clorofila a (d en algunas Florideo- phyceae) R y C-ficocianina Aloficocianina R y B-fico-eritrina. α, β-caroteno Xantofilas	Almidón de floridano (similar a la amilopectina)	Celulosa Xilanos Polisacáridos sulfatados (galactanos)	Presente

Están presentes en todo el mundo y encuentran en todas las zonas costeras, desde las zonas tropicales hasta las polares. Las algas marinas se clasifican en función de: la naturaleza de las clorofilas, los pigmentos fotosintéticos, la química de su pared celular, la flagelación y los polímeros de reserva sintetizados. Resultando en tres divisiones principales: algas verdes (*Chlorophyta*), algas rojas (*Rhodophyta*) y algas pardas (*Phaeophyta*) (figuras 3A-3C, respectivamente) cuyas características principales se muestran en la tabla 1.

Las especies que constituyen los arribazones de macroalgas pertenecen al género *Sargassum*, y son de la clase *Phaeophyceae* (algas pardas) que, aunque es de las más comunes y frecuentes, no es el único componente del sargazo. Sin embargo, fue su nombre genérico el que se usó para nombrarlas de manera coloquial (Ortegón Aznar & Ávila Mosqueda, 2020). Es decir, las algas pardas (*Phaeophyceae*) son consideradas algas del género del sargazo.

Resultados y discusión

En esta sección, se presenta la recapitulación de diferentes estudios en los que se han utilizado varias especies de sargazo para la remoción de dos colorantes con diferente naturaleza química: azul de metileno y rojo Congo. Se discuten los efectos de los parámetros que afectan la capacidad de adsorción de los colorantes como: el pH de la solución acuosa, la presencia de los iones H^+ y OH^- puede afectar la superficie del adsorbente y propiciar la adsorción de ciertos io-

nes. La concentración inicial del colorante, diferentes concentraciones iniciales del colorante se utilizan para construir y modelar la isoterma de adsorción de la cual se pueden obtener parámetros importantes que describan el mecanismo de la adsorción. Tiempo de contacto, indica el tiempo necesario para lograr la saturación del adsorbente y los modelos cinéticos proporcionan información sobre la etapa controlante de la velocidad. La temperatura de la solución afecta la ad-

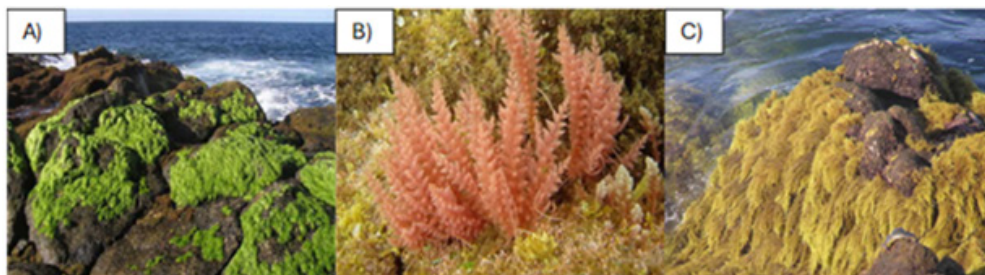


Figura 3. Ejemplos de algas, verde *Ulva rotundata* (A), alga roja *Asparagopsis armata* (B) y alga parda *Treptacantha abies-marina* (C). Fuente: <https://www.canariasconservacion.org/ALGAS>

sorción e indica la naturaleza de adsorción (exotérmica o endotérmica). Por último, el efecto de la dosis de biomasa en la adsorción de los colorantes proporciona la cantidad necesaria para remover cierta concentración de colorante.

Efecto del pH de la solución acuosa

En este apartado, se presentan resultados de la adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo en diferentes especies de algas pardas, así como el efecto que tiene pH de la solución acuosa en la adsorción de los colorantes. En la tabla 2, se muestran el porcentaje remoción (%), la capacidad máxima de adsorción de los colorantes en diferentes especies de algas. De igual manera, se incluye el pH óptimo de la solución y el pH del punto cero de carga (pH_{pzc}) del biosorbente.

El valor del pH del medio acuoso es importante en los procesos de adsorción, ya que de ello depende las interacciones entre el contaminante y la superficie del adsorbente. Para remover el colorante azul de metileno, se han utilizado diferentes especies de algas

pardas. Se muestran porcentajes de adsorción mayores al 50 % usando las especies de algas pardas *Sargassum dentifolium*, *Sargassum muticum* y *Sargassum ilicifolium*. Adicionalmente, las algas *Laminaria japónica* y *Sargassum hemiphyllum* adsorbieron 90.48 y 187.04 $mg\ g^{-1}$ de azul de metileno, respectivamente. Se observa un intervalo de pH óptimo de 5-7, este rango óptimo se atribuye al punto cero de carga de las algas marinas. Por ejemplo, las algas *Sargassum ilicifolium* y *Laminaria japónica* tienen un pH_{pzc} =3.6 y 3.02, respectivamente.

Cuando el pH de la solución es mayor al pH_{pzc} , la superficie del adsorbente se torna negativa (Zhu *et al.*, 2021), razón por la cual mejora la adsorción de colorantes catiónicos, como es el azul de metileno. Se han utilizado las algas *Sargassum latifolium* y *Sargassum dentifolium* para remover otro tipo de colorantes, como el rojo Congo, un colorante azoico. Se observa que el valor óptimo para remover el colorante es 5, para ambas especies de algas. Este valor óptimo de pH, además de atribuirse al pH_{pzc} . Se puede atribuir al pKa del rojo Congo que es igual 4.5, lo

Tabla 2.Valores de pH óptimos para la adsorción de azul de metileno y rojo Congo sobre diferentes especies de sargazo.						
Colorante	Alga	Q_{max} (mg/g)	Eficiencia de remoción (%)	pH óptimo	pHPZC	Referencia
Azulde metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	-	95.61	7	9	(Moghazy <i>et al.</i> , 2019)
Azulde metileno	<i>Sargassum muticum</i>	-	94.00	5	3.6	(Hannachi & Hafidh, 2020)
Azulde metileno	<i>Sargassum ilicifolium</i>	-	69.70	7	-	(Tabaraki & Sadeghinejad, 2017)
Azulde metileno	<i>Laminaria japónica</i>	90.48	-	6	3.02	(Shao <i>et al.</i> , 2017)
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	20.97	-	5	7.85	(Fawzy & Gomaa, 2021)
Rojo Congo	<i>Sargassum dentifolium</i>	-	79%	5	-	(Labena <i>et al.</i> , 2021)

que indica que a pH mayores a 4.5 (Batool et al, 2021), el colorante se encuentra en forma aniónica por lo que aumenta la repulsión y no se favorece la adsorción a valores de pH altos. Para ambos colorantes y las diferentes especies de alga se reportaron altas eficiencias de remoción a valores de pH de entre 5 y 7. Estos valores son valores cercanos a la neutralidad. Lo cual supondría un aspecto positivo para el tratamiento de efluentes cargados con colorantes.

Efecto de la concentración inicial del colorante

La relación entre la concentración del colorante y la capacidad de adsorción del biosorbente se representa mediante isothermas de adsorción. Los modelos de isoterma nos aportan información valiosa para comprender el comportamiento del adsorbente y el adsorbato (Dada et al., 2021). En particular, el modelo de Langmuir tiene como principales suposiciones: la adsorción del adsorbato se da en monocapa, el proceso de adsorción se produce en sitios localizados definidos idénticos y equivalentes (superficie homogénea), todos los sitios deben tener igual afinidad hacia el adsorbato (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). En la tabla 3 se muestran los diferentes modelos de isothermas de adsorción que se han aplicado para la adsorción de colorantes en diferentes especies de sargazo, el modelo de isoterma de Langmuir describe bien la adsorción del colorante azul de metileno en las especies *Sargassum hemiphyllum*, *Cystoseira barbata* y *Laminaria japonica*.

Los parámetros del modelo de isoterma de Langmuir son: la capacidad máxima de adsorción por monocapa ($Q_{\max}$, mg g⁻¹) y

la constante K_L (L mg⁻¹). $Q_{\max}=729.93$ y 416.67 mg g⁻¹ para *Sargassum hemiphyllum* y *Laminaria japonica*, respectivamente, son capacidades de adsorción altas, lo cual refleja la alta afinidad de estas algas pardas sobre el colorante catiónico (azul de metileno). En la tabla 3, también se muestran los resultados obtenidos para la adsorción del colorante rojo Congo. En un estudio realizado por Fawzy & Gomaa (2021) aplicaron la especie de sargazo *Sargassum latifolium* y obtuvieron $Q_{\max}=20.97$ mg g⁻¹, mientras que Labena y colaboradores (2021) obtuvieron una capacidad máxima de adsorción ($Q_{\max}=28.24$ mg g⁻¹) utilizando la especie *Sargassum dentifolium*. Estas capacidades son bajas en comparación a las que se han obtenido para el colorante azul de metileno. Sin embargo, es importante mencionar que el colorante rojo Congo es un colorante azoico que son difíciles de remover (Szygula et al, 2008). Adicionalmente, el modelo de isoterma de Freundlich, también se ajustó para la adsorción del colorante azul de metileno sobre el alga *Cystoseira barbata* y para la adsorción del colorante rojo Congo sobre *Sargassum latifolium*.

Por otro lado, el modelo de Freundlich contempla las siguientes suposiciones: la adsorción del adsorbato sobre el adsorbente puede ser multicapa, la adsorción puede ser reversible, y que la superficie del adsorbente es heterogénea (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Los parámetros del modelo de isoterma de Freundlich son: n (parámetro adimensional) y la constante K_F ((mg g⁻¹)(L mg⁻¹)^{1/n}). Valores de n entre 1 y 10, indican una adsorción favorable. En la Tabla 3 se observan valores de $n=2.56$ y 1.14 para la adsorción de azul de metileno sobre *Cystoseira barbata* y rojo

Tabla 3. Modelos de isotermas de adsorción aplicados en la adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo en diferentes especies de sargazo.

Colorante	Alga	Modelo de isoterma	Parámetros	Concentración inicial (mg L ⁻¹)	Referencia
Azul de metileno	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	Langmuir	$Q_{\max}$ (mg g ⁻¹) = 729.93 K_L (L mg ⁻¹) = 0.07 $R^2 = 0.990$	30-1000	Liang <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Cystoseira barbata</i>	Langmuir	$Q_{\max}$ (mg g ⁻¹) = 14.97 K_L (L mg ⁻¹) = 1.79 $R^2 = 0.961$	5-300	Ozudogru <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Cystoseira barbata</i>	Freundlich	$n = 2.56$ $K_F((\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n}) = 6.94$ $R^2 = 0.981$	5-300	Ozudogru <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Laminaria japonica</i>	Langmuir	$Q_{\max}$ (mg g ⁻¹) = 416.67 K_L (L mg ⁻¹) = 0.069 $R^2 = 0.972$	20-250	Shao <i>et al.</i> , 2017
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	Langmuir	$Q_{\max}$ (mg g ⁻¹) = 20.97 K_L (L mg ⁻¹) = 0.139 $R^2 = 0.987$	5-15	Fawzy & Gomaa, 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	Freundlich	$n = 1.14$ $K_F((\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n}) = 2.55$ $R^2 = 0.988$	5-15	Fawzy & Gomaa, 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum dentifolium</i>	Langmuir	$Q_{\max}$ (mg g ⁻¹) = 28.24 K_L (L mg ⁻¹) = 0.073 $R^2 = 0.9937$	50-200	Labena <i>et al.</i> , 2021

Congo sobre *Sargassum latifolium*, respectivamente, indicando así, una adsorción favorable. Por lo tanto, el ajuste ambos modelos de isotermas de adsorción implica múltiples y favorables interacciones entre los colorantes y las diferentes especies de sargazo.

Efecto del tiempo de contacto

El tiempo del contacto es un parámetro muy importante en la adsorción de contaminantes debido a que nos aporta el tiempo en el cual la adsorción de colorante ha llegado al equilibrio. Algunos investigadores han encontrado tiempos de adsorción cortos. Pratiwi y colaboradores encontraron que la adsorción de azul de metileno en *Sargassum duplicatum* alcanzaba el equilibrio en 70 minutos a una concentración inicial de 20

mg L⁻¹. Por otra parte, la mayor eficiencia de remoción de azul de metileno sobre *Sargassum dentifolium* obtenida en un estudio realizado por (Labena *et al.*, 2021) fue a un tiempo de contacto de 30 min a una concentración inicial de 100 ppm. Con respecto a la remoción del colorante rojo Congo, se han obtenido tiempos de remoción más largos, por ejemplo 240 min a una concentración inicial de 50 mg L de rojo Congo utilizando como biosorbente el alga parda *Sargassum dentifolium* (Labena *et al.*, 2021). Sin embargo, la adsorción del colorante rojo Congo sobre *Sargassum latifolium* (Fawzy & Gomaa, 2021) alcanzó el equilibrio en un tiempo de 45 minutos a una concentración inicial de 20 mg L⁻¹. De acuerdo con lo anterior, se ha reportado una adsorción más

rápida de azul de metileno en comparación con rojo Congo, esto se puede atribuir a que existe mayor interacción electrostática entre las cargas positivas de los colorantes catiónicos y la superficie negativa de las especies de sargazo (El Atouani *et al.*, 2019)

El efecto del tiempo en la adsorción se puede modelar matemáticamente mediante modelos cinéticos de adsorción. Los resultados cinéticos obtenidos por diferentes estudios de adsorción de colorantes sobre especies de sargazo se muestran en la tabla 4. La cinética de la adsorción de azul de metileno sobre *Sargassum muticum*, *Sargassum latifolium* y *Sargassum dentifolium* presentó los valores de R^2 más altos para el modelo de pseudo-segundo orden. Además, las capacidades de adsorción experimentales ($Q_{e(\text{exp})}$) están más cerca a los valores calculados ($Q_{e(\text{calc})}$) con el modelo de pseudo-segundo orden. Por lo tanto, la cinética de la adsorción de azul de metileno sobre las especies de sargazo mencionadas anteriormente se ajustó mejor al modelo cinético de pseudo-segundo orden. Mismos resultados se muestran en la tabla 4 para la adsorción del colorante rojo Congo sobre *Sargassum latifolium* y *Sargassum dentifolium*. Cuando la cinética de la adsorción sigue el modelo de pseudo-segundo orden se ha sugerido un mecanismo de adsorción químico (quimisorción) sobre la superficie del adsorbente (Fawzy & Gomaa, 2021).

Efecto de la temperatura

La importancia de conocer el efecto de la temperatura en la adsorción de colorantes nos da información sobre si aumenta o disminuye la remoción de los colorantes al aplicar mayor o menor temperatura. Por lo tanto, puede conducir a la optimización de la remoción de colorantes. En este aparta-

do, se presentan estudios de adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo sobre algas pardas a diferentes temperaturas. El efecto de la temperatura impacta directamente en la naturaleza del proceso de adsorción. En la tabla 5, se observa una naturaleza exotérmica de la adsorción de azul de metileno sobre las especies *Sargassum muticum* y *Sargassum dentifolium*. La naturaleza exotérmica, nos indica que la adsorción es favorable a bajas temperaturas (Fawzy & Gomaa, 2021), y representa una ventaja por el ahorro energético. Sin embargo, Liang *et al.* (2017), encontraron un comportamiento endotérmico para la adsorción de azul de metileno sobre el alga *Sargassum hemiphyllum*. De acuerdo a Fawzy & Gomaa (2021), la naturaleza de la adsorción del colorante rojo Congo también fue endotérmica. Lo que significa que la adsorción de los colorantes es favorable a altas temperaturas (Fawzy & Gomaa, 2021). En la tabla 5, también se muestran los intervalos de temperatura a la que se realizó la experimentación. Los estudios en los que se utilizaron las especies *Sargassum dentifolium*, *Sargassum hemiphyllum* y *Sargassum latifolium* se encuentran en un intervalo de 20 a 50 °C, el cual se podría considerar como un intervalo de temperatura no muy elevado, accesible para la remoción de los colorantes usando las especies de sargazo.

Efecto de la dosis de la biomasa

Estudiar el efecto de la dosis de adsorbente nos permite optimizar el proceso de adsorción, es decir, la cantidad de alga que proporcionará una mayor eficiencia de remoción o mayor capacidad de adsorción. En este apartado, se presentan las dosis óptimas de diferentes especies de sargazo para la re-

Tabla 4. Modelos cinéticos de adsorción aplicados en la adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo en diferentes especies de sargazo.

Colorante	Alga	Modelo de isoterma	Parámetros	Concentración inicial (mg L ⁻¹)	Referencia
Azul de metileno	<i>Sargassum muticum</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 1.059 K_1 (min ⁻¹) = 0.023 $R^2 = 0.970$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 9.55	20	El Atouani <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Sargassum muticum</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 9.615 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.081 $R^2 = 0.999$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 9.55	20	El Atouani <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Sargassum latifolium</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 6.43 K_1 (min ⁻¹) = 0.027 $R^2 = 0.865$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 9.21	20	Fawzy & Gomaa, 2021
Azul de metileno	<i>Sargassum latifolium</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 9.77 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.008 $R^2 = 0.993$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 9.21	20	Fawzy & Gomaa, 2021
Azul de metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 1.0365 K_1 (min ⁻¹) = 0.0018 $R^2 = 0.0025$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 65.25	80	Moghazy <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 65.8 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.256 $R^2 = 0.9999$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 65.25	80	Moghazy <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Laminaria japonica</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 1.68 K_1 (min ⁻¹) = 0.0018 $R^2 = 0.980$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 91.38	65	Shao <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Laminaria japonica</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 91.74 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.0457 $R^2 = 0.999$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 91.38	65	Shao <i>et al.</i> , 2017
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 6.33 K_1 (min ⁻¹) = 0.040 $R^2 = 0.989$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 8.25	20	Fawzy & Gomaa, 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 9.21 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.0083 $R^2 = 0.999$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 8.25	20	Fawzy & Gomaa, 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum dentifolium</i>	Pseudo-primer orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 3.16 K_1 (min ⁻¹) = -2.09 $R^2 = 0.9602$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 16.1	50	Labena <i>et al.</i> , 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum dentifolium</i>	Pseudo-segundo orden	Q_e (calc) (mg g ⁻¹) = 17.5439 K_2 [g mg ⁻¹ ·min ⁻¹] = 0.04828 $R^2 = 0.9926$ Q_e (exp) (mg g ⁻¹) = 16.1	50	(Labena <i>et al.</i> , 2021)

moción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo (tabla 6). Se obtuvo una eficiencia de remoción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo mayor a 90 % para 4 diferentes especies de sargazo (tabla 6), utilizando dosis de 1 a 2 g L⁻¹. Las dosis mencionadas, se consideran bajas y reflejaron altos valores de remoción. Por arriba de estas dosis, la remoción ya no aumentaba. Este comportamiento se debe a que a dosis bajas hay mayor disponibilidad de sitios activos (El Atouani *et al.*, 2019) por lo tan-

to una mayor eficiencia de remoción de los colorantes. Mientras que, a altas dosis de biosorbente se produce aglomeración y, en consecuencia, obstruyen los sitios de unión disminuyendo la eficiencia de remoción (Pratiwi *et al.*, 2020).

Comparación con otros biosorbentes usados para la eliminación de colorantes

Debido al interés que se ha generado en los últimos años sobre la remoción de los colo-

Tabla 5. Efecto de la temperatura en la adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo sobre diferentes especies de sargazo.					
Colorante	Alga	Intervalo de temperatura (°C)	Naturelaza de la adsorción	Concentración inicial (mg L ⁻¹)	Referencias
Azul de metileno	<i>Sargassum muticum</i>	20-80	Exotérmico	100	El Atouani <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	20-50	Exotérmico	80	Moghazy <i>et al.</i> , 2019
Azul de metielno	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	20-40	Endotérmico	400	Liang <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Laminaria japonica</i>	25-40	Endotérmico	20-250	Shao <i>et al.</i> , , 2017
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	25-45	Endotérmico	20	Fawzy & Gomaa, 2021

Tabla 6. Efecto de la dosis de distintas especies de sargazo en la adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo.					
Colorante	Alga	Dosis de biosorbente (g L ⁻¹)	Eficiencia de remoción (%)	Concentración inicial (mg L ⁻¹)	Referencias
Azul de metileno	<i>Sargassum duplicatum</i>	1	90	20	Pratiwi <i>et al.</i> , 2020)
Azul de metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	2	94	30	Moghazy <i>et al.</i> , 2019)
Azul de metileno	<i>Sargassum muticum</i>	2	95	20	El Atouani <i>et al.</i> , 2019)
Azul de metileno	<i>Laminaria japonica</i>	0.6	99	65	Shao <i>et al.</i> , 2017
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	2	95	20	Fawzy & Gomaa, 2021

rantes, muchos materiales se han utilizado para removerlos del agua. En este apartado nos enfocamos en presentar la recapitulación de investigaciones sobre la remoción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo utilizando diferentes biosorbentes. La capacidad máxima de adsorción de azul de metileno sobre diferentes biosorbentes presenta un intervalo de 9.41 a 188.68 mg g⁻¹ (tabla 7), siendo el valor mínimo para el bagazo de la caña de azúcar y el máximo para la cáscara de sandía. Mientras que, para

las algas pardas, el intervalo es de 66.60 a 863.40 mg g⁻¹. Por lo tanto, las diferentes especies de sargazo presentan una mayor capacidad de adsorción de azul de metileno que otros biosorbentes. En la tabla 7, también se muestran las capacidades máximas de adsorción de rojo Congo empleando diferentes biosorbentes, cuyo intervalo se encuentra entre 1.10 a 29.68 mg g⁻¹. Con respecto a las especies de sargazo, se reportaron capacidades máximas de adsorción iguales a 20.97 y 28.24 mg g⁻¹ para *Sargassum latifolium* y

Tabla 7. Comparación de la capacidad máxima de adsorción de los colorantes azul de metileno y rojo Congo sobre distintos biosorbentes y especies de algas pardas.

Colorante	Biosorbente	Capacidad máxima de adsorción (Q _{max} , mg g ⁻¹)	Referencias
Azul de metileno	Bagazo de caña de azúcar	9.41	Siqueira <i>et al.</i> , 2020
Azul de metileno	Madera de <i>Carica papaya</i>	32.25	(Rangabhashiyam <i>et al.</i> , 2018)
Azul de metileno	Cáscara de café	79.60	Njanja <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	Paja de arroz	158.00	Jawad <i>et al.</i> , 2020
Azul de metileno	Vaina de <i>Calotropis gigantea</i>	88.36	Ammar <i>et al.</i> , 2021
Azul de metileno	Cáscara de sandía (<i>Citrullus lanatus</i>)	188.68	Jawad <i>et al.</i> , 2018
Rojo Congo	Cáscara de naranja	22.44	Namasivayam <i>et al.</i> , 1996
Rojo Congo	Desecho de col	2.313	Wekoye <i>et al.</i> , 2020
Rojo Congo	<i>Antigonon leptopus</i>	18.18	Devi <i>et al.</i> , 2019
Rojo Congo	Hojas de mango	23.09	Adelaja <i>et al.</i> , 2019
Rojo Congo	Cáscara de Toronja	1.10	(Jayarajan <i>et al.</i> , 2011)
Rojo Congo	Hojas de eucalipto	29.68	R. Kumari <i>et al.</i> , 2020
Azul de metileno	<i>Sargassum dentifolium</i>	66.60	Moghazy <i>et al.</i> , 2019
Azul de metileno	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	729.93	Liang <i>et al.</i> , 2017
Azul de metileno	<i>Sargassum muticum</i>	92.00	Hannachi & Hafidh, 202)
Azul de metileno	<i>Sargassum ilicifolium</i>	319.90	Tabaraki & Sadeghinejad, 2017
Azul de metileno	<i>Durvillaea antarctica</i>	702.90	Guarín <i>et al.</i> , 2018
Azul de metileno	<i>Nizamuddinina zanardinii</i>	863.40	Daneshvar <i>et al.</i> , 2019
Rojo Congo	<i>Sargassum latifolium</i>	20.97	Fawzy & Gomaa, 2021
Rojo Congo	<i>Sargassum dentifolium</i>	28.24	Labena <i>et al.</i> , 2021

Sargassum dentifolium, respectivamente. Estos últimos valores menores en comparación a las capacidades de adsorción de azul de metileno, lo cual se debe a que son colorantes de distinta naturaleza química. Además,

el rojo Congo es un colorante azoico. La remoción de estos es aún un reto, debido a que son recalcitrantes, no biodegradables y persistentes en el medio ambiente (Selvaraj *et al.*, 2021).

Conclusiones

Las recientes investigaciones sobre la remoción de colorantes disueltos en agua por el método de adsorción utilizando los desechos naturales como biosorbentes han mostrado buenos resultados. Los estudios sobre la eliminación de colorantes catiónicos como, por ejemplo, el azul de metileno por medio de las diferentes especies de algas pardas, como una especie de sargazo arrojan altos porcentajes y capacidades de adsorción en comparación con otros biosorbentes. Con respecto a la remoción de colorantes aniónicos como, por ejemplo, el colorante azoico, rojo Congo, existen escasos estudios que utilizan especies de sargazo como biosorbente diferentes, sin embargo, los resultados

mostraron mejores capacidades de adsorción que otros biosorbentes. Las condiciones óptimas que se reportaron para la remoción de azul de metileno y rojo Congo sobre las diferentes especies de sargazo fueron: el pH de la solución entre 5 y 7, tiempos de adsorción de 30 a 240 min, la dosis de sargazo de 1 a 2 g L⁻¹, temperatura de 20 a 30 °C. Los valores anteriores, representan condiciones posibles de lograr y que pueden indicar la viabilidad de su aplicación para la remoción de los colorantes en agua. Los resultados demostraron que la aplicación del sargazo es una opción efectiva, ecológica y sostenible para la eliminación de colorantes en agua.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAH-CYT) por su apoyo para realizar este proyec-

to, a la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), al Laboratorio de Materiales Avanzados a cargo del Dr. Mohamed Abatal.

Literatura citada

- Adelaja, O. A., Bankole, A. C., Oladipo, M. E. & Lene, D. B. (2019). Biosorption of Hg(II) ions, Congo red and their binary mixture using raw and chemically activated mango leaves. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3, 1–12.
- Al-Ghouti, M. A. & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 1–22.
- Ammar, C., El-Ghoul, Y. & Jabli, M. (2021). Characterization and valuable use of *Calotropis gigantea* seedpods as a biosorbent of methylene blue. *International Journal of Phytoremediation*, 23(10), 1085–1094.
- Batool, M., Khurshid, S., Qureshi, Z. & Daouish, W. M. (2021). Adsorption, antimicrobial and wound healing activities of biosynthesized zinc oxide nanoparticles. *Chemical Papers*, 75, 893–907.
- Cetacean Research Society. (2020). Algas. Canarias conservación. <https://www.canariasconservacion.org/ALGAS/>
- Csillag, K., Emri, T., Rangel, D. E. N. & Pócsi, I. (2023). pH-dependent effect of Congo Red on the growth of *Aspergillus nidulans* and *Aspergillus niger*. *Fungal Biology*, 127(7–8), 1180–1186.
- Dada, A. O., Adekola, F. A., Odebunmi, E. O., Ogunlaja, A. S. & Bello, O. S. (2021). Two–three parameters isotherm modeling, kinetics with statistical validity, desorption and thermodynamic studies of adsorption of Cu(II) ions onto zerovalent iron nanoparticles. *Scientific Reports*, 11, 1–15.
- Daneshvar, E., Vazirzadeh, A. & Bhatnagar, A. (2019). Biosorption of Methylene Blue Dye onto Three Different Marine Macroalgae: Effects of Different Parameters on Isotherm, Kinetic and Thermodynamic. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 43(6), 2743–2754.
- Davis, T. A., Volesky, B. & Mucci, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37(18), 4311–4330.
- Devi, V. S., Sudhakar, B., Prasad, K., Jeremiah Sunadh, P. & Krishna, M. (2019). Adsorption of Congo red from aqueous solution onto *Antigonon leptopus* leaf powder: Equilibrium and kinetic modeling. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3197–3206. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.715>
- El Atouani, S., Belattmania, Z., Reani, A., Tahiri, S., Aarfane, A., Bentiss, F., Jama, C., Zrid, R. & Sabour, B. (2019). Brown Seaweed *Sargassum muticum* as Low-Cost Biosorbent of Methylene Blue. *International Journal of Environmental Research*, 13(1), 131–142. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0161-4>
- Fawzy, M. A. & Gomaa, M. (2021). Low-cost biosorption of Methylene Blue and Congo Red from single and binary systems using *Sargassum latifolium* biorefinery waste/wastepaper xerogel: an optimization and modeling study. *Journal of Applied Phycology*, 33, 675–691.
- Guarín, J. R., Moreno-Pirajan, J. C. & Giraldo, L. (2018). Kinetic study of the bioadsorption of methylene blue on the surface of the biomass obtained from the algae *D. antarctica*. *Journal of Chemistry*, 2018, 1–12.
- Hannachi, Y. & Hafidh, A. (2020). Biosorption potential of *Sargassum muticum* algal biomass for methylene blue and lead removal from aqueous medium. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(9), 3875–3890.
- Herbst, Willy., Hunger, Klaus. & Wilker, Gerhard. (2004). Industrial organic pigments : production, properties, applications. Wiley-VCH.

- Hernández García, K. M., Fuentes Sánchez, C. E., Cano Salazar, J. R., Flores Moreno, J. & Cruz Santana, A. (2020). Adsorción de colorantes provenientes de los residuos acuosos de la industria textil con hidróxidos dobles laminares de MgFeAl. Universidad Autónoma Metropolitana *Revista Tendencias En Docencia e Investigación En Química*, 6(6), 1–2.
- Jawad, A. H., Hum, N. N. M. F., Farhan, A. M. & Mastuli, M. S. (2020). Biosorption of methylene blue dye by rice (*Oryza sativa* L.) straw: Adsorption and mechanism study. *Desalination and Water Treatment*, 190, 322–330.
- Jawad, A. H., Ngoh, Y. S. & Radzun, K. A. (2018). Utilization of watermelon (*Citrullus lanatus*) rinds as a natural low-cost biosorbent for adsorption of methylene blue: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Taibah University for Science*, 12(4), 371–381.
- Jayarajan, M., Arunachalam, R. & Annadurai, G. (2011). Use of Low Cost Nano-porous Materials of Pomelo Fruit Peel Wastes in Removal of Textile Dye. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(5), 434–443.
- Khan, A. A., Kumari, S., Chowdhury, A. & Husain, S. (2018). Phase tuned originated dual properties of cobalt sulfide nanostructures as photocatalyst and adsorbent for removal of dye pollutants. *ACS Applied Nano Materials*, 1(7), 3474–3485.
- Kumari, D., Mazumder, P., Kumar, M., Deka, J. P. & Shim, J. (2018). Simultaneous removal of Congo red and Cr (VI) in aqueous solution by using Mn powder extracted from battery waste solution. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 459–464.
- Kumari, R., Mohanta, J., Dey, B. & Dey, S. (2020). Eucalyptus leaf powder as an efficient scavenger for Congo red from water: Comprehensive batch and column investigation. *Separation Science and Technology* (Philadelphia), 55(17), 3047–3059.
- Labena, A., Abdelhamid, A. E., Amin, A. S., Husien, S., Hamid, L., Safwat, G., Diab, A., Gobouri, A. A. & Azab, E. (2021). Removal of methylene blue and congo red using adsorptive membrane impregnated with dried *Ulva fasciata* and *Sargassum dentifolium*. *Plants*, 10(2), 1–26.
- Le Moal, M., Gascuel-Oudou, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., & Pinay, G. (2019). Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of the Total Environment*, 651, 1–11.
- Leudjo Taka, A., Fosso-Kankeu, E., Pillay, K. & Yangkou Mbianda, X. (2020). Metal nanoparticles decorated phosphorylated carbon nanotube/cyclodextrin nanosponge for trichloroethylene and Congo red dye adsorption from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 1–11.
- Liang, J., Xia, J. & Long, J. (2017). Biosorption of methylene blue by nonliving biomass of the brown macroalga *Sargassum hemiphyllum*. *Water Science and Technology*, 76(6), 1574–1583.
- Moghazy, R. M., Labena, A. & Husien, S. (2019). Eco-friendly complementary biosorption process of methylene blue using micro-sized dried biosorbents of two macro-algal species (*Ulva fasciata* and *Sargassum dentifolium*): Full factorial design, equilibrium, and kinetic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 330–343.
- Namasivayam, C., Muniasamy, N., Gayatri, K., Rani, M. & Ranganathan, K. (1996). Removal of dyes from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel. *Bioresource Technology*, 57, 37–43.
- Njanja, E., Mbokou, S. F., Pontie, M., Nacef, M. & Tonle, I. K. (2019). Comparative assessment of methylene blue biosorption using coffee husks and corn cobs: towards the elaboration of a lignocellulosic-based amperometric sensor. *SN Applied Sciences*, 1(6).

- Ortegón Aznar, I. & Ávila Mosqueda, V. (2020). Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial?
- Ozudogru, Y., Merdivan, M. & Goksan, T. (2017). Removal of methylene blue from aqueous solutions by brown alga *cystoseira barbata*. *Des. and Water Treat.*, 62, 267–272.
- Pratiwi, D., Poeloengasih, C. D., Suryani, R. & Rizqi, N. C. (2020). Adsorption of basic dye methylene blue by brown algae *Sargassum duplicatum*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 462(1), 1–7.
- Rahimian, R. & Zarinabadi, S. (2020). A review of Studies on the Removal of Methylene Blue Dye from Industrial Wastewater Using Activated Carbon Adsorbents Made from Almond Bark. *Progress in Chemical and Biochemical Research Journal Homepage*, 3(3), 251–268.
- Rangabhashiyam, S., Lata, S. & Balasubramanian, P. (2018). Biosorption characteristics of methylene blue and malachite green from simulated wastewater onto *Carica papaya* wood biosorbent. *Surfaces and Interfaces*, 10, 197–215.
- Rodríguez Martínez, R. E., Medina Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy Velázquez, L. V., Almazán Becerril, A., Delgado Pech, B., Vásquez Yeomans, L., Francisco, V. & García Rivas, M. C. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201–205.
- Rodríguez Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B. & Jordán-Dahlgren, E. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano (pp. 354–355).
- Roy Choudhury, A. K. (2011). Dyeing of synthetic fibres. In *Handbook of Textile and Industrial Dyeing* (pp. 40–128). Elsevier.
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A. & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1–3), 1–13.
- Selvaraj, V., Swarna Karthika, T., Mansiya, C. & Alagar, M. (2021). An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. *Journal of Molecular Structure*, 1224, 1–15.
- Shao, H., Li, Y., Zheng, L., Chen, T. & Liu, J. (2017). Removal of methylene blue by chemically modified defatted brown algae *Laminaria japonica*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, 525–532.
- Sharma, J., Sharma, S. & Soni, V. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 1–17.
- Siqueira, T. C. A., da Silva, I. Z., Rubio, A. J., Bergamasco, R., Gasparotto, F., Paccola, E. A. de S. & Yamaguchi, N. U. (2020). Sugarcane bagasse as an efficient biosorbent for methylene blue removal: Kinetics, isotherms and thermodynamics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 1–13.
- Szyguła, A., Guibal, E., Ruiz, M. & Sastre, A. M. (2008). The removal of sulphonated azo-dyes by coagulation with chitosan. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 330(2–3), 219–226.
- Tabaraki, R. & Sadeghinejad, N. (2017). Biosorption of six basic and acidic dyes on brown alga *Sargassum ilicifolium*: Optimization, kinetic and isotherm studies. *Water Science and Technology*, 75(11), 2631–2638.
- Tarek, M. & Saleem, A. (1988). Methods for staining amyloid in tissues. A review. 63, 201–212.
- Wekoye, J. N., Wanyonyi, W. C., Wangila, P. T. & Tonui, M. K. (2020). Kinetic and equilibrium studies of Congo red dye adsorption on cabbage waste powder. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 24–31.
- Wong, Y. & Yu, J. (1999). Laccase-catalyzed decolorization of synthetic dyes. *Water Research*, 33(16), 3512–3520.

- Xue-Yun, Y., Ji-Gang, C. & Yong-Ning, H. (1990). Studies on the relation between bladder cancer and benzidine or its derived dyes in Shanghai. *British Journal of Industrial Medicine*, 47, 544–552.
- Zhu, X., Wan, Z., Tsang, D. C. W., He, M., Hou, D., Su, Z. & Shang, J. (2021). Machine learning for the selection of carbon-based materials for tetracycline and sulfamethoxazole adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 406, 1–10.

