

Universidad de los Andes

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**MICROROBOTS FUNCIONALIZADOS CON
SILANOS E INMOVILIZACION DE ENZIMA
LACASA PARA LA DEGRADACIÓN DE TINTE
AZOICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES**

Proyecto Fin de Carrera

Autor:
Daniela Gutierrez

Asesor Principal:
Profesor Johann F. Osma Ph.D

Diciembre 2022

Abstract

Se realizó la comprobación de la capacidad absorbente de la funcionalización con APTES y la inmovilización con enzima Lacasa derivada de *Pycnoporus Sanguineus* para la remoción de tinte azoico Rojo Congo en disoluciones acuosas. Se revisó el comportamiento de adsorción bajo la variación de la concentración inicial de tinte, manteniendo constantes condiciones de pH y temperatura. Se calculó una eficiencia máxima de adsorción de 39,7% bajo prueba espectrofotométrica, por medio de un ajuste al modelo de Langmuir, Freundlich y Temkin. Se comprobó que el método de adsorción por enzima Lacasa es viable para el tratamiento primario de aguas residuales contaminadas con compuestos de tipo azóico.

Index Terms

Rojo Congo, Microrobots, Lacasa, funcionalización, inmovilización, APTES, absorción, espectrofotometría

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua potable lentamente se convierte en una de las amenazas más importantes para la salud pública a nivel global. Actualmente, más de 2300 millones de personas en el mundo padecen el desabastecimiento y se proyecta que a causa del cambio climático y crecimiento poblacional, esta cifra aumentará [1]. Por tal motivo, encontrar fuentes de suministro diferentes, como el agua subterránea o los tratamientos para la purificación de agua se convierte en una de las apuestas más importantes. Sin embargo, a su vez esto implica otro desafío, pues la contaminación causada por actividades antropogénicas en la forma de metales pesados, detergentes, microfibras plásticas y no plásticas, agroquímicos, solventes industriales, entre otros, contribuyen a la polución en ecosistemas acuáticos [2]. Una de las actividades que presenta algunos de los mayores índices de contaminación es la industria textil, donde el uso de tintes especialmente de tipo azoicos representa entre el 60% y 70% de los desechos químicos. [3]

Un cambio de coloración en fuentes de agua, impide que la luz solar penetre al lecho acuático y por ende, inhibe la fotosíntesis en plantas y algas, provocando condiciones anaeróbicas en el medio [1]. Esto resulta especialmente cierto para el caso del Rojo Congo, un colorante azoico sintético utilizado en la tinción de algodón en la industria, químicamente conocido como 3,3-(1E,1E)-bifenil-4,4-diilbis(diazeno-2,1-diil)bis(4-aminonaftaleno-1-sulfonato), posee una simetría estructural compuesta de una amina aromática, lo que le confiere una alta estabilidad térmica y fisicoquímica así como fotorresistencia dificultando su biodegradación [5], además de provocar su clasificación como componente potencialmente cancerígeno.

En la actualidad, buscando la degradación y limpieza de colorantes en ambientes acuáticos, se han evaluado diversos métodos entre los que se incluye la coagulación, floculación, ósmosis inversa, degradación por microorganismos, adsorción, degradación por ultrasonido y fotodegradación por nombrar algunos.[11] No obstante, la aplicación de varios de ellos poseen la desventaja de una costosa aplicación, incumplimiento de requisitos de vertido de aguas residuales, regeneración del adsorbente o rápido deterioro de membranas de limpieza, por nombrar algunos. Hasta el momento, el que ofrece mayores beneficios en términos de costo-eficiencia corresponde al método de adsorción, que consiste en la adherencia superficial entre adsorbente y adsorbato debido a la interacción entre fuerzas moleculares.

Para el presente trabajo se hizo el uso de 3-aminopropiltrióxido de silano hidrolizado (APTES) un componente de acoplamiento de silano que generalmente, aumenta la cantidad de sitios de amina para interactuar con otros compuestos, enzima lacasa (p-difenol:oxígeno oxidoreductasas) perteneciente a la subfamilia de enzimas oxireductasas que posee la capacidad para la oxidación de fenoles y aminas aromáticas y se emplea en la industria para el blanqueamiento de textiles [7], en conjunto con glutaraldehído como sustancia reticulante. La funcionalización química de superficies semiconductoras es cada vez más utilizada en la investigación biotecnológica pues permite manipular materiales para otorgarles propiedades deseadas. En este caso, se realizó dicho proceso sobre microrobots (MRs) manufacturados a partir de láminas de Níquel (Ni) y polvo coercitivo de ferrita de estroncio.

Se trata de una solución eficiente, económica y fácilmente replicable para el tratamiento de agua contaminada por tintes que, gracias al proceso de funcionalización e inmovilización, evita la permanencia de residuos químicos derivados de los agentes absorbentes inoculados y que dada las propiedades magnéticas y la flotabilidad que otorga la disposición geométrica de los microcomponentes manufacturados (MRs), facilita la extracción de los agentes del medio tratado, con el área superficial suficiente como para permitir un proceso de adsorción exitoso.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

El proceso experimental puede diferenciarse en 2 grandes partes. La primera correspondiente a la manufactura de microrobots, abreviados MRs por facilidad y la segunda, corresponde a el diseño experimental para el proceso de adsorción.

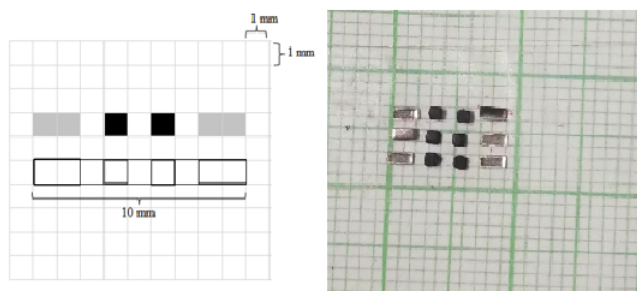


Fig. 1: Manufactura MRs

Table 1. Materiales para la fabricación MRs:

Ítem	Descripción	Dimensiones	Cantidad
Láminas Magnéticas	Polvos coercitivos de ferritina de estroncio	1mm x 1mm x 1mm	150
Láminas Rectangulares	Níquel (Ni)	2mm x 1mm x 1mm	150
Pinzas	Plásticas	N/A	1
Cinta Adhesiva	Transparente de marca Tesa ref. 51134	N/A	1
Papel	Milimetrado	10cm x 5cm	1

B. Reactivos

Para las pruebas experimentales los reactivos empleados fueron Rojo Congo de la referencia Sigma-Aldrich, el Glutardialdehído de la referencia Merck Millipore, también una solución de 3-aminopropil trietoxisilano (APTES) y enzima Lacasa.

1) Lacasa

La enzima Lacasa provino de la extracción de micelos del sobrenadante del cultivo del hongo *Pycnoporus Sanguineus* CS43 mediante filtración con filtros de flujo tangencial en serie con poros de 0,5 y 0,2 μm secuencialmente, para posteriormente, realizar el ultrafiltrado con una membrana de peso molecular 10kDa [4].

Table 2. Reactivos para el diseño experimental:

Ítem	Descripción	Dimensiones	Cantidad
Condo Red		[]: 15, 30,45,60 mg/L	8.4mg
Glutaraldehido	Merck Millipore	2:3 MRs 2%v/v	50uL
APTES	2%v/v	2:3 MRs	50uL
Enzima Lacasa	Pycnopus Sanguineus	1:3 MRs	200uL
Agua	Mili-Q	N/A	250mL

C. Equipos

El resumen de equipos empleados para la experimentación se encuentra a continuación:

Table 3. Equipos para el diseño experimental:

Ítem	Descripción
Sonicador	Gemoro SparkleSPX
Vórtex	Boeco V-1 plus
Espectrofotometro	Genesys 105 UV-V15
Micropipeta	Giant 10-1000uL

D. Diseño Experimental

Manufactura MRs

La primera, correspondiente al proceso de manufactura de microrobots (MRs), los cuales individualmente consisten en una tira de cinta adhesiva transparente marca Tesa ref 51134 de 10 mm sobre la que se ubicaron 1 par de láminas rectangulares de Níquel (Ni) de 2mm de largo, 1mm de alto y 0.3mm de espesor y 1 par de láminas cuadradas fabricadas con polvos coercitivos de ferritina de estroncio de 1mm con 0.5mm de espesor, con la ayuda de pinzas plásticas. Como se observa en la Figura 1. Para el proceso de manufactura, se llevo a cabo el siguiente procedimiento

que demostró ser el más eficiente, en términos de facilidad de manufactura y replicabilidad entre unidades. En primer

lugar, se posiciono la cinta comercial transparente con el anverso adhesivo contrario a la superficie de contacto sobre una hoja de papel milimetrado, fijándola con cinta adhesiva en los extremos. En segundo lugar, con el uso de pinzas plásticas, se colocaron 2 láminas de níquel (Ni) con orientación horizontal, a una separación de 5 mm entre sí. Dejando una distancia de 1 mm entre cada pieza, para posicionar las láminas magnéticas cuadradas cuidando que la polaridad del anverso en ambas fuera la misma. Fue necesario esperar unos instantes para asegurar la fijación de las piezas.

Cabe mencionar, que la estructura planar empleada para los microrobots esta basada en la capacidad de flotabilidad de la microestructura y su comportamiento magnético [13]

Preparación de tratamientos

Se conformaron 3 grupos de 24 unidades de MRs cada uno, para dividirlos como se describe: 1:3 grupo control, 1:3 funcionalización con APTES, 1:3 inmovilización de enzima Lacasa.

Funcionalización con APTES

Para este proceso se repartieron 2:3 del total de microrobots en 2 tubos de ensayo distintos sumergidos en agua Q-Mili hasta cubrirlos por completo. Se adicionaron 50uL de 3-aminopropil trietoxisilano (APTES) al 2% v/v. Para mezclar homogéneamente y asegurar la adherencia del reactivo, se utilizó el proceso de sonicación, en el sonicador Gemoro SparkleSPX durante 30 minutos. Una vez terminado el proceso, se agregaron 50 uL de Glutaraldehído de referencia Merck Millipore al 2% v/v y se llevó al agitador vórtex Boeco V-1 plus durante 2 minutos a 200 rpm.

Finalmente, se mantuvo estático durante 40 minutos más antes de lavar y almacenar.

Inmovilización con Enzima Lacasa

Para la inmovilización con Lacasa, primero se realizó la funcionalización con APTES descrito anteriormente, y se agregaron 200uL de enzima Lacasa sobre el grupo de microrobots. Se dejó estático durante un mínimo de 12 horas.

1) Prueba Experimental

Después de pesar 8,4 mg de Rojo Congo, se diluyó en 140 mL de agua Q-Mili (Solución Madre). Se realizaron las diluciones necesarias para obtener las 4 concentraciones correspondientes a 15,30,45,60 mg/L. Por cada concentración se dispusieron 9 envases de vidrio dentro de los que se vertieron 5mL de la solución correspondiente, para luego introducir 2 MRs de cada tratamiento por envase; el grupo control, funcionalización con APTES y el grupo con Lacasa inmovilizada. Para cada tratamiento se realizaron 3 réplicas de manera que, en total se realizaron 36 muestras experimentales para 4 concentraciones.

La medición de adsorción se realizó a partir de técnica analítica óptica con el espectrofotómetro Genesys 105 UV-V15 siguiendo el postulado de la Ley de Beer-Lambert. La cual establece, la existencia de una relación entre la transmitancia y las propiedades químicas y concentración de una sustancia. [5] De modo que, la longitud de onda en 495nm para la toma de datos de Rojo Congo y mediante fotodetectores, se tomaron los datos de la cantidad de intensidad de luz reflejada por cada muestra de concentración sin tratamiento y las de cada muestra tratada, para realizar la comparación.

III. RESULTADOS

1) ANOVA

Para verificar un grado de adsorción para ambas técnicas con respecto al grupo control, se utilizó un análisis estadístico ANOVA con un grado de confianza del 5%, como se muestra:

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	1,05728186	3	0,35242729	144,560842	1,6992E-15	3,00878657
Columns	0,17064217	2	0,08532108	34,9975389	7,6785E-08	3,40282611
Interacción	0,08844072	6	0,01474012	6,04619533	0,00057901	2,50818882
Dentro del grupo	0,05851	24	0,00243792			
Total	1,37487475	35				

De acuerdo con los resultados arrojados por la prueba estadística ANOVA, dado que $p < 0,05$, se rechaza H_0 y por comparación de las medias entre los 3 grupos, se comprueba que se generó un grado de adsorción importante por ambos métodos; APTES y Lacasa, en comparación con el grupo control. Por lo que a pesar de los posibles errores experimentales, se puede afirmar una relativa efectividad del método en el tratamiento de agua residual contaminada por tinte azoico.

2) Degradación Rojo Congo

Posterior a validar que efectivamente existió un proceso de adsorción tomando como referencia el grupo control. Se comparo el porcentaje absorbido por cada técnica en el equilibrio a través de la siguiente expresión:

$$\%RC = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (1)$$

Donde C_i corresponde a la concentración pre-adsorción y C_f para la concentración post-adsorción.

La Figura 2 presenta el porcentaje de absorción ante distintas concentraciones de Rojo Congo medida a través de una prueba de absorción en espectrofotómetro. Cabe aclarar, que la eficiencia de inmovilización por test de enzima para el procedimiento descrito, en términos de sobrenadante y concentración de la enzima es de 94.4% en las láminas de Níquel (Ni) y del 96.5% para las láminas magnéticas que componen los microrobots. [4]

De acuerdo con los resultados, el grupo de microrobots con inmovilización superficial de enzima Lacasa, presenta los mayores porcentajes de absorción para las 4 concentraciones de Rojo Congo como se observa en la Figura 2.

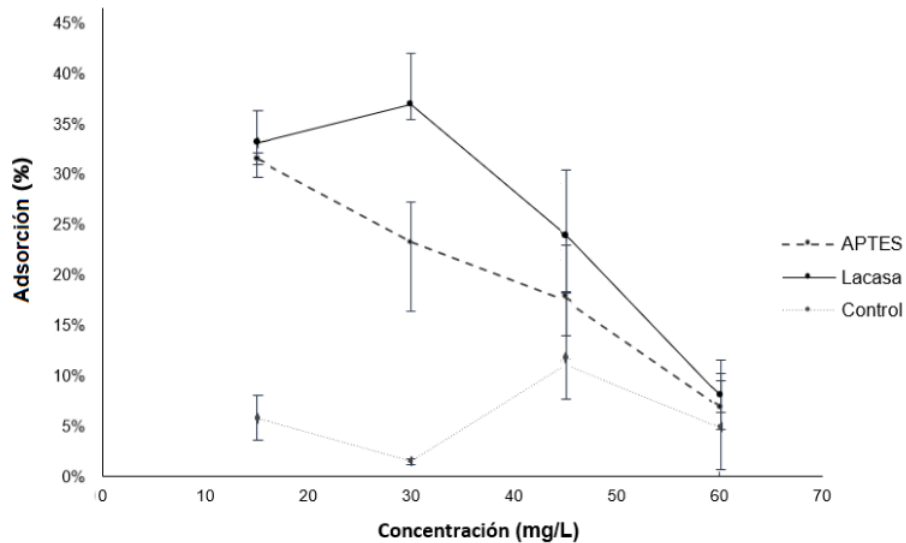


Fig. 2: Porcentaje de absorción por espectrofotometria

La adsorción bajo este tratamiento, fue especialmente alta para la concentración de 30 mg/L con un adsorción 39,66% después de permanecer estático durante 12 horas. Mientras que para el caso de APTES se logró el máximo con un 33,8%, para la concentración inicial de 15 mg/L, seguido de 24,97% para 30 mg/L.

Cabe resaltar que se presenta una evidente tendencia hacia la disminución de la capacidad de adsorción sin importar el método, conforme se aumenta la concentración inicial. Como es el caso, para las concentraciones de 45 mg/L y 60 mg/L, donde el porcentaje se reduce a 25,84% y 8,67% respectivamente con el tratamiento con Lacasa y de 18,82% y 7,38 % para el tratamiento con APTES.

Para explicar este comportamiento, cabe recordar la definición del proceso de adsorción. Puede pensarse que a esta concentración, las fuerzas moleculares se intensifican provocando una mejor adsorción química. Mientras que, a medida que aumenta la concentración inicial pueden derivarse en fuerzas moleculares repulsivas que afectan

la interacción con el adsorbente. [10]

Asimismo, es coherente que la mayor efectividad haya sido obtenida para el tratamiento con enzima inmovilizada, pues la presencia de Glutaraldehído y APTES combinados, junto con la Lacasa potencian la adsorción. A causa de que la enzima Lacasa posee una baja especificidad de superficie y acelera la degradación por oxidación de otras sustancias, por lo que al combinarla con APTES, por su naturaleza, genera mayores enlaces que intervienen en la adsorción de los grupos amina presentes en la composición química del Rojo Congo. [6]

3) Isotermas de adsorción

Las constantes de Langmuir y Freundlich determinadas a partir de las pendientes e intersecciones de la gráfica respectiva se resumen en la tabla 5, tabla 6 y tabla 7. A pesar de que las constantes son específicas para las condiciones de prueba y el tipo de adsorción, los resultados indican una evaluación comparable de los adsorbentes preparados e investigados.

Isoterma Langmuir

El modelo teórico de Langmuir describe la ocupación progresiva sobre la superficie de absorción hasta la conformación de un monocapa homogénea donde la capacidad de absorción llega a su límite, es decir tiene una capacidad finita y se define mediante la siguiente ecuación linealizada, a una temperatura constante:

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{b}C_e + \frac{1}{kb} \quad (2)$$

Donde q_e corresponde al parámetro que indica la cantidad absorbida en el equilibrio (mg/g), b es la afinidad de absorción entre biosorbente y adsorbato.

Rojo Congo	q_e	b	K	R	q_e	b	K_a	R
15	0,3793	0,0861	3,24E-10	0,879	0,6916	0,0538	1,533E-08	0,8703
30	0,6356				0,8944			
45	0,904				1,925			
60	0,379				9,727			

0,691607319 height

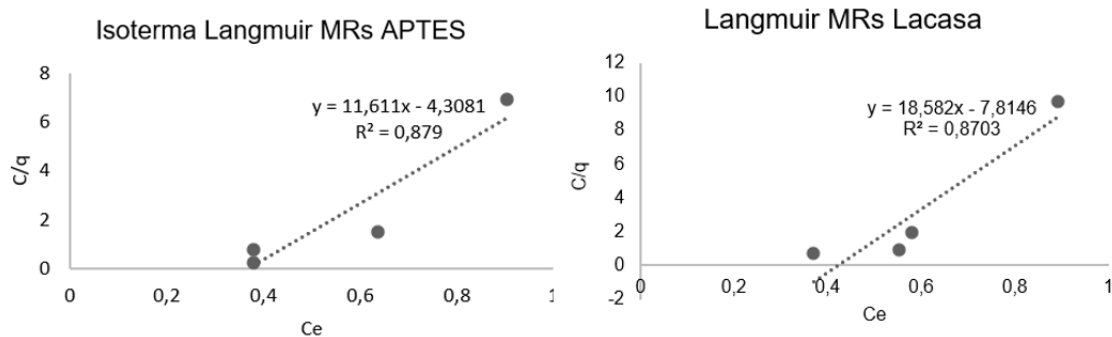


Fig. 3: Isoterma de Langmuir a) en el caso de funcionalización APTES y b) inmovilización con Lacasa

Teniendo en cuenta que, el coeficiente de determinación fue cercano 1 para ambos métodos, para APTES fue de 0.75 y Lacasa 0.87. Se evidencia un ajuste considerable al modelo y relativamente alta fiabilidad. De manera que, el comportamiento de absorción puede describirse como homogéneo-monocapa [15].

Isoterma Freundlich

Este modelo empírico a diferencia de Langmuir, describe la absorción multicapa para una afinidad heterogénea con la superficie, originalmente se derivó para proceso de adsorción en estado gaseoso para observar el efecto de la presión, pero se ha aplicado para otros estados de la materia.

Puede definirse con la siguiente ecuación linealizada:

$$\log q = \frac{1}{n} \log C + \log K_f \quad (3)$$

Donde q_e es la cantidad de adsorción en el equilibrio (mg/g), mientras C_e indica la concentración de adsorbato en el equilibrio (mg/L), K_f corresponde a la constante de adsorción relativa a la capacidad de adsorción del adsorbente y por último, n parámetro adimensional que indica la intensidad de adsorción del sistema.

Rojo Congo	q_e	n	K_f	R	q_e	n	K_f	R
15	0,513	-0,481	0,127	0,7543	0,558	-0,417	0,088	0,788
30	0,450				0,672			
45	0,133				0,363			
60	1,576				0,095			

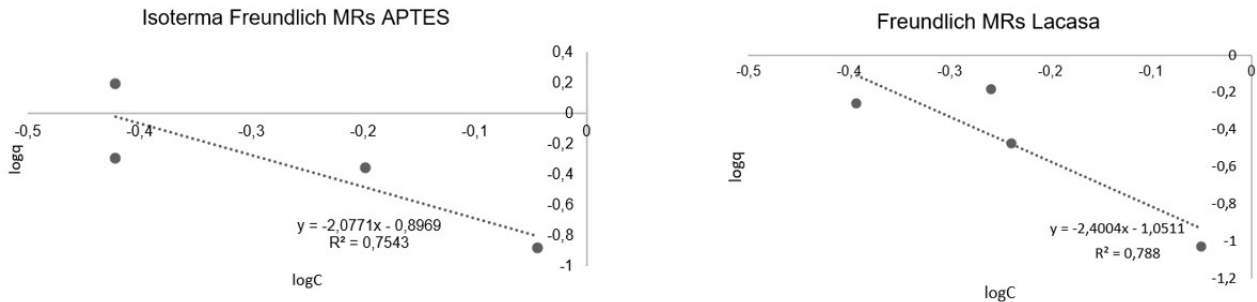


Fig. 4: isoterma de Freundlich a) para el caso de funcionalización APTES y b) inmovilización con Lacasa

El coeficiente de determinación es inferior para ambas técnicas, siendo igual o inferior a 0.7, indicando entonces, que este modelo no se ajusta con tanta precisión al proceso medido. De modo que puede pensarse que no se trata proceso heterogéneo a nivel molecular, que se vea afectado en cierta por la presión ejercida.

Al comparar con estudios de adsorción con colorante naranja de metilo, es decir tinte azoico [10] así como estudios de adsorción para azul de metileno con carbón activado [14], se encuentra que el modelo que presenta mejor ajuste para esos casos, también suele ser el de Langmuir, sugiriendo que para colorantes azoicos la adsorción sigue un patrón homogéneo-monocapa.

Los valores de la constante de Freundlich K_f en el resultado indica el grado de eliminación de Rojo Congo, por lo tanto, son una medida de capacidad de adsorción comparable con q_e en el modelo Langmuir [14].

El parámetro de adsorción n , donde un valor alto indica un fuerte enlace entre adsorbente y adsorbato en la isoterma de Freundlich que mide la adsorción preferencial de un adsorbato a otro, se compara directamente con la constante de Langmuir K_l correspondiente a la intensidad de la adsorción, un factor que se relaciona con el calor de adsorción y la afinidad por el sitio de unión.[16]

Isoterma Temkin

El modelo de Temkin supone que el calor de adsorción de las moléculas disminuye de manera lineal, a medida que aumenta la cobertura superficial del adsorbente, así que que la adsorción se caracteriza por una distribución uniforme de las energías de enlace, hasta un energía de enlace máxima [17]. La expresión linealizada es la siguiente:

$$q_e = B_1 \ln K_t + B_1 \ln C_e \quad (4)$$

Donde K_t es la constante de enlace en el equilibrio, B_1 es una constante relativa al calor de adsorción.

Rojo Congo	q_e	B_1	K_t	R	q_e	B_1	K_t	R
15	0,513	-1,0661	0,994	0,5199	0,558	-0,549	0,772	0,6188
30	0,450				0,672			
45	0,133				0,363			
60	1,576				0,095			

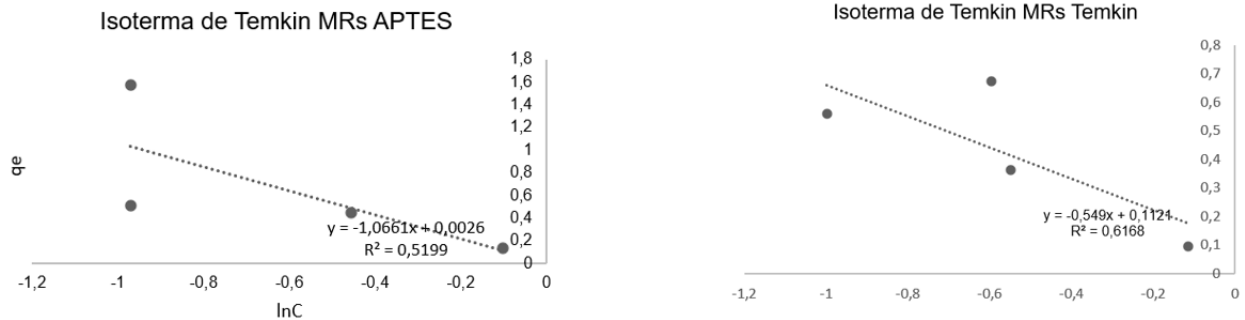


Fig. 5: Isoterma de Temkin a) para MRs funcionalizados con APTES y b) en el caso de MRs con enzima lacasa inmovilizada

Dado que el coeficiente de determinación es cercano a 0.5, este modelo no posee un buen ajuste con el comportamiento del proceso de adsorción medido.

IV. CONCLUSIONES

A modo de conclusión, el modelo experimental realizado permitió el modelo de adsorción que demostró un mejor ajuste fue el de Langmuir, sugiriendo un comportamiento en el proceso de adsorción para Rojo Congo de tipo homogéneo-monocapa.

La inmovilización de Lacasa para la adsorción de tinte azoico presentó la efectividad máxima de 39.66% para la disolución de 30 mg/L mientras, el tratamiento con APTES alcanzó máxima efectividad con 33.8% para la solución con una concentración de 15 mg/L. Es importante notar, que un aumento en la concentración inicial de tinte, no significó un aumento en la cantidad de adsorción de los tratamientos y de hecho disminuyó su porcentaje de efectividad para las 2 técnicas. Lo que conlleva a pensar que un aumento en la concentración de tinte, implica también un aumento en las fuerzas moleculares repulsivas con el adsorbente. De ser cierto, sería necesario considerar

nuevas variaciones en los tratamientos, para potenciar su efectividad en escenarios donde se presenten mayores concentraciones de contaminante.

Es necesario realizar mayor cantidad de pruebas al respecto como exploración a futuro para llegar a conclusiones más detalladas. En las que podrían plantearse pruebas con una disposición geométrica diferente que permita maximizar el área superficial, sin comprometer la flotabilidad ni facilidad de extracción. Puede resultar de interés medir la capacidad de adsorción aplicada a otro tipo de contaminantes con el fin, de comprobar su alcance como solución al tratamiento de aguas residuales. Asimismo, de acuerdo con la revisión bibliográfica, sería interesante evaluar el comportamiento bajo distintos niveles de pH y temperatura, dado que se ha registrado que dichas variables intervienen en la interacción química de los compuestos, lo que podría aumentar la eficacia de adsorción.

V. BIBLIOGRAFIA

REFERENCES

- [1] Kumar,R.Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment, 2014
- [2] Rania Al-Tohamy, Sameh S. Ali, Fanghua Li, A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 231, 2022
- [3] Harja, M., Buema, G. Bucur, D. Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Sci Rep* 12, 6087 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598022100933>
- [4] Peñaranda,P. Magnetic micro-robots with surface functionalization of silanes and laccase for wastewater treatment with heavy metals and dyes, 2019.
- [5] Nieves Abril Díaz, J. Antonio Bárcena Ruiz, Emilio Fernández Reyes1, Fermín Toribio Meléndez-Valdés1. *Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*,2004.
- [6] Helssing, Maja. ,Adsorption and Ordering of Surface Active Molecules and Particles at Solid Interfaces and in Bulk,2012
- [7] Hinda Lachheb, Eric Puzenat, Ammar Houas, Photocatalytic degradation of various types of dyes (Alizarin S, Crocein Orange G, Methyl Red, Congo Red, Methylene Blue) in water by UV-irradiated titania, *Applied Catalysis B: Environmental*,Volume 39, Issue 1, 2002
- [8] C. Namasivayam, D. Kavitha, Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste,*Dyes and Pigments*,Volume 54, Issue 1, 2002,
- [9] Hojoong Kim and Jang-Yeon Kwon,Enzyme immobilization on metal oxide semiconductors exploiting amine functionalized layer, 2017
- [10] Mejia G, Cardona, Rios,L.Absorption thermodynamic study of azoic dye with by means of a lignocellulosic waste in aqueous medium, 2018
- [11] Michael M. Tauber, Georg M. Gübitz, Astrid Rehorek, Degradation of azo dyes by oxidative processes Laccase and ultrasound treatment,*Bioresource Technology*,Volume 99, Issue 10,2008
- [12] Dewi,R .Progress in Emerging Contaminants Removal by Adsorption/Membrane Filtration-Based Technologies: A Review, 2021
- [13] Zuñiga,F .Magnetic forces and kinematic modeling of folding microrobots for wastewater treatment, 2021
- [14] Okeola F, Odebunmi, E.Freundlich and Langmuir Isotherms Parameters for Adsorption of Methylene Blue by Activated Carbon Derived from Agrowastes, 2021
- [15] Uddin, M.T., M.S. Islam and M.Z. Abedin, 2007. "Adsorption of phenol from aqueous solution by water hyacinth ash." *ARPN J of Engineering and Applied sciences*, 2(2): 121-128.
- [16] Nwabanne, J.T. and P.K. Igbokwe, 2008. "Kinetics and equilibrium modeling of nickel adsorption by cassava peel." *J. of Engineering and Applied Sciences*, 3(11): 829-834
- [17] J. S. Piccin, G. L. Dotto and L. A. A. Pinto. ADSORPTION ISOTHERMS AND THERMOCHEMICAL DATA OF FDC RED N° 40 BINDING BY CHITOSAN, 2010

VI. ANEXOS

RESUMEN	R	A	L	Total
<i>Concentración 1 (15mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	1,613	1,138	1,108	3,859
Promedio	0,53766667	0,37933333	0,36933333	0,42877778
Varianza	0,00055633	0,00030233	0,00088233	0,00712344
<hr/>				
<i>Concentración 2 (30mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	2,707	2,064	1,66	6,431
Promedio	0,90233333	0,688	0,55333333	0,71455556
Varianza	1,2333E-05	0,004039	0,00410633	0,02527378
<hr/>				
<i>Concentración 3 (45mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	2,07	1,907	1,742	5,719
Promedio	0,69	0,63566667	0,58066667	0,63544444
Varianza	0,004329	0,00285233	0,00508433	0,00530778
<hr/>				
<i>Concentración 4 (60mg/L)</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	2,776	2,712	2,674	8,162
Promedio	0,92533333	0,904	0,89133333	0,90688889
Varianza	0,00598633	0,000775	0,00032933	0,00199411
<hr/>				
<i>Total</i>				
Cuenta	12	12	12	
Suma	9,166	7,821	7,184	
Promedio	0,76383333	0,65175	0,59866667	
Varianza	0,02976088	0,03947075	0,04024406	

Fig. 6: Resumen prueba de ANOVA

Tabla. Resultados Espectrofotometría por triplicado

Concentración 1 (15mg/L)	R	0,56
		0,513
		0,54
	A	0,399
		0,373
		0,366
	L	0,336
		0,393
		0,379
Concentración 2 (30mg/L)	R	0,906
		0,902
		0,899
	A	0,658
		0,645
		0,761
	L	0,537
		0,624
		0,499
Concentración 3 (45mg/L)	R	0,615
		0,738
		0,717
	A	0,576
		0,652
		0,679
	L	0,593
		0,504
		0,645
Concentración 4 (60mg/L)	R	0,969
		0,836
		0,971
	A	0,909
		0,929
		0,874
	L	0,872
		0,908
		0,894

Fig. 7: Resultados de espectrofotometría por triplicado para cada concentración

Tabla. Parámetros para MRs Grupo Control sin tratamiento

[I]	Ci	Ce	1/Ce	logCe	C/q	InCe
15 mg/L	0,573	0,56	1,7857143	-0,251812	24,123077	-0,5798185
	0,573	0,513	1,9493177	-0,2898826	4,38615	-0,6674794
	0,573	0,54	1,8518519	-0,2676062	8,8363636	-0,6161861
30 mg/L	0,917	0,576	1,7361111	74,621455	-0,2395775	-0,5516476
	0,917	0,652	1,5337423	54,240267	-0,1857524	-0,4277107
	0,917	0,679	1,4727541	44,900056	-0,1681302	-0,3871342
45 mg/L	0,783	0,915	1,0928962	-0,0385789	2,2513393	-0,0888312
	0,783	0,938	1,0660981	-0,0277972	12,1032	-0,0640053
	0,783	0,917	1,0905125	-0,0376307	7,7892273	-0,0866478
60 mg/L	0,976	0,779	1,283697	134,13729	-0,1084625	-0,2497442
	0,976	0,836	1,1961722	4,9921143	-0,0777937	-0,1791267
	0,976	0,79	1,2658228	188,5682	-0,1023729	-0,2357223

Fig. 8: Parámetros generales para el grupo sin tratamiento

Tabla. Parámetros para MRs tratamiento APTES

[I]	Ci	Ce	1/Ce	logCe	C/q	InCe
15 mg/L	0,573	0,399	2,5062657	-0,3990271	0,9149483	-0,9187939
	0,573	0,373	2,6809651	-0,4282912	0,695645	-0,9861769
	0,573	0,366	2,7322404	-0,4365189	0,6471304	-1,0051219
30 mg/L	0,917	0,658	1,5197568	1,6716757	-0,1817741	-0,4185503
	0,917	0,645	1,5503876	1,5295037	-0,1904403	-0,438505
	0,917	0,761	1,3140604	3,7123141	-0,1186153	-0,2731219
45 mg/L	0,783	0,979	1,0214505	-0,0092173	1,6027826	-0,0212236
	0,783	1,202	0,8319468	0,0799045	3,2450687	0,1839868
	0,783	1,033	0,9680542	0,0141003	4,4330865	0,0324672
60 mg/L	0,976	0,909	1,10011	12,332552	-0,0414361	-0,0954102
	0,976	1,029	0,9718173	18,362574	0,0124154	0,0285875
	0,976	0,874	1,1441648	7,4889804	-0,0584886	-0,1346749

Fig. 9: Parámetros generales para el tratamiento con APTES

Tabla. Parámetros para MRs tratamiento Lacasa

[I]	Ci	Ce	1/Ce	logCe	C/q	InCe
15 mg/L	0,573	0,336	2,9761905	-0,4736607	0,4763544	-1,0906441
	0,573	0,393	2,5445293	-0,4056074	0,85805	-0,9339457
	0,573	0,379	2,6385224	-0,4213608	0,7404175	-0,9702191
30 mg/L	0,917	0,537	1,8621974	0,7588658	-0,2700257	-0,6217572
	0,917	0,624	1,6025641	1,3289283	-0,2048154	-0,4716049
	0,917	0,499	2,004008	0,5956962	-0,3018995	-0,6951492
45 mg/L	0,783	1,093	0,9149131	0,0386202	1,8507842	0,0889262
	0,783	0,504	1,984127	-0,2975695	0,9104516	-0,685179
	0,783	1,245	0,8032129	0,0951694	3,0146739	0,2191355
60 mg/L	0,976	0,992	1,0080645	7,3113846	-0,0034883	-0,0080322
	0,976	1,148	0,8710801	12,124471	0,0599419	0,1380213
	0,976	0,894	1,1185682	9,7467805	-0,0486625	-0,1120495

Fig. 10: Parámetros generales para el tratamiento con Lacasa



Fig. 11: Stock de concentración sin tratamiento de referencia

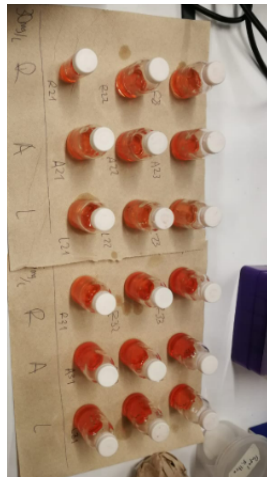


Fig. 12: Evidencia diseño experimental por triplicado