



Facultad de
Ciencias e Ingeniería

REMOCIÓN DEL COLORANTE AZOICO TARTRAZINA (E-102) MEDIANTE EL
USO DE $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ EN MUESTRAS ACUOSAS

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO
EN QUÍMICA

AUTOR(ES)

LIMBA HEIDY CAHUANA MELGAREJO
LISELY KEYKO PAREDES MAMANI

ASESOR(ES)

WILNER VALENZUELA BARRIENTOS

CO-ASESOR(ES)

ADOLFO LA ROSA TORO GOMEZ

LIMA – PERÚ
2026

Jurado calificador

Presidente: Dr. Guillermo Santillán Zea

Vocal: Lic. Enrique Guzmán Lezama

Secretario: Dr. Francisco José Peirano Blondet

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	CAHUANA MELGAJERO LIMBA HEIDY
2.	PAREDES MAMANI LISELY KEYKO

(Agregar filas adicionales si hay más autores)

Pertenecientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE QUÍMICA** autores del trabajo titulado: **Remoción del colorante azoico tartrazina (E-102) mediante el uso de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ en muestras acuosas**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN QUÍMICA** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	VALENZUELA BARRIENTOS WILNER	FACI	ASESOR
2.	LA ROSA TORO GOMEZ ADOLFO	-	CO ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **18%**, según el reporte emitido por el software Turnitin® (identificador de entrega: **3653301411**; fecha de entrega: **18/09/2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 18 de septiembre de 2026**



Firma del asesor

N° DNI: 44134956

ORCID: 0000-0001-9276-5454



Firma del co asesor

N° CE: 28314878,

ORCID: 0000-0001-8143-9936

DEDICATORIA:

Limba:

A **Nuestro Padre Celestial**, que me sostuvo cuando el camino se volvió incierto y me regaló claridad cuando el cansancio nubló mis días. A Él, que ha sido mi faro, mi abrigo y mi impulso en todo momento. A Él entrego este logro, con gratitud sincera y el corazón rendido en humildad.

A mis padres, **Gloria, César y Juan**, por su amor, paciencia y aliento constante. Y especialmente a mi madre **Gloria**, motor incansable de mi vida, por creer en mí incluso cuando mis fuerzas flaqueaban.

A mis primas **Catherin y Valentina**, compañeras de alma y de vida, por su amor que viaja a través de una pantalla y llega siempre a tiempo entre risas que curan y silencios que abrazan, por su compañía que fue refugio en los días grises y alegría en los días bañados de sol.

A mi compañera de tesis, **Lisely**, por su constancia, su serenidad y su entrega compartida. Gracias por caminar conmigo este trayecto con compromiso y fe.

A mis amigos **Bruno, Aranza, Patricia y Omar**, por estar presentes sin pedir nada, por sus palabras oportunas y reconfortantes, por sus gestos amables y su amistad genuina que florece justo cuando el alma lo necesita.

Y a mi querido asesor **Will**, quien se volvió un amigo leal. Gracias por tu guía paciente, tu entusiasmo y tu confianza, que hicieron de esta meta un camino más ligero.

Lisely:

Se lo dedico a **Dios**, fuente de mi fuerza y mi calma, por susurrarme al corazón que no me rinda, por acompañarme en silencio en cada paso y abrazarme con su luz cuando todo parecía oscurecerse.

A mi estimada **madre Julia**, quien ha sido mi mayor inspiración a lo largo de este camino; su recuerdo y su amor me han dado el impulso para seguir adelante cuando más lo necesitaba, convirtiéndose en una fuerza silenciosa pero constante en cada uno de mis logros.

A mi querido **padre Rogelio, a mis hermanos y a toda mi familia**, por ser mi raíz y mi impulso, por no soltarme nunca, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por caminar conmigo en cada subida con orgullo y sostenerme con amor en cada bajada.

A mis apreciados amigos **Ángela Castro, Jhusmira y Jorge**, con quienes compartí no sólo clases y desvelos, sino también abrazos sinceros, carcajadas necesarias y la certeza de que nunca estuve sola en este viaje.

A mi entrañable madrina **Natali**, por su apoyo constante, su amabilidad y por ser una guía fundamental a lo largo de mi formación académica, siempre como una figura materna y a mi estimado asesor **Will**, por su paciencia, orientación y valiosos consejos que hicieron posible la culminación de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, por habernos brindado la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan significativa en nuestra formación profesional como químicos.

Manifestamos nuestro más sincero agradecimiento a la **Universidad Peruana Cayetano Heredia**, nuestra alma mater, por habernos formado con excelencia académica, ética y rigurosidad científica. Esta tesis es el reflejo del compromiso que Cayetano imprime en cada uno de sus estudiantes, y nos sentimos profundamente orgullosas de representarla en este trabajo de investigación.

Expresamos nuestro especial reconocimiento al **Dr. Wilner Valenzuela**, asesor de nuestra tesis, por su constante guía, exigencia académica y compromiso durante todas las etapas del desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para mantenernos enfocados y motivados. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al **Dr. Adolfo La Rosa**, co-asesor, por sus valiosos aportes técnicos, su generosidad al compartir su conocimiento y su disposición permanente para orientarnos con claridad y precisión científica.

Agradecemos también al **Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada (GIEA)** de la **Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)** por brindarnos acceso a su infraestructura, equipos y un ambiente de trabajo que potenció nuestro aprendizaje práctico y académico. Este apoyo fue crucial para la ejecución experimental de nuestra tesis. De manera muy especial, reconocemos a nuestros compañeros del **Laboratorio de Electroquímica Aplicada**, quienes, más allá de ser colegas, se convirtieron en amigos entrañables. Compartimos con ellos conocimientos, dudas, logros, anécdotas y momentos que enriquecieron profundamente esta experiencia. Su compañerismo, generosidad y el clima de confianza que supimos construir juntos, quedarán siempre como uno de los recuerdos más valiosos de esta etapa.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, nos brindaron su apoyo, tiempo o palabras de aliento, muchas gracias. Cada gesto sumó a que este proyecto se hiciera realidad.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
I. INTRODUCCIÓN	5
II. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Adsorción.....	10
2.2. Tipos de Adsorción	11
2.2.1. Adsorción física	11
2.2.2. Adsorción química	11
2.3. Factores determinantes de la adsorción.....	12
2.4. Estructuras de redes metal-orgánicas (MOF's).....	12
2.4.1. Características de los MOF's como adsorbentes.....	13
2.4.2. Mecanismos posibles de adsorción	13
2.4.2.1. Interacción electrostática.....	14
2.4.2.2. Interacción ácido - base.....	14
2.4.2.3. Interacción puente de hidrógeno	14
2.4.2.4. Interacción π - π	15
2.4.2.5. Interacción hidrofóbica	15
2.5. Isotermas de adsorción.....	15
2.5.1. Isoterma de Langmuir	16
2.5.2. Isoterma de Freundlich.....	17
2.6. Cinética de adsorción.....	18
2.6.1. Cinética pseudo- primer orden (Lagergren).....	18
2.6.2. Cinética pseudo- segundo orden (Ho y McKay).....	19
2.7 Técnicas de caracterización de MOF	19
III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	21
3.1. Hipótesis.....	21
3.2. Objetivos:	21
3.2.1. Objetivo general:	21
3.2.2. Objetivos específicos:	21
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1. Materiales y equipos	22

4.1.1. Materiales en estudio.....	22
4.1.2. Materiales de laboratorio.....	22
4.1.3. Equipos.....	23
4.1.4. Reactivos.....	24
4.1.5. Instalaciones:.....	24
4.2. Metodología	25
4.2.1. Preparación de Fe_3O_4	25
4.2.2. Preparación de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$	25
4.2.3. Procedimiento de adsorción del colorante	26
4.2.4. Reutilización del adsorbente MOF $\text{Fe}_3\text{O}_4 @\text{NH}_2 \text{-MIL-101(Fe)}$	26
V. RESULTADOS.....	27
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
VII. CONCLUSIONES	61
VIII. LIMITACIONES	62
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS:	67

ABREVIATURAS

MOF	<i>Metal-Organic Framework</i> (Redes Metal-Orgánico)
DRX	Difracción de Rayos X
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)
BET	Análisis de Área Superficial por el Método de Brunauer–Emmett–Teller
UV-Vis	Espectroscopía Ultravioleta-Visible
R²	Coefficiente de determinación (para ajustar modelos cinéticos o de isoterma)
λ_{max}	Longitud de onda de máxima absorción (nm)
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno (medida de acidez/basicidad)
Q_t	Capacidad de adsorción en el tiempo t (mg/g)
C_t	Concentración del adsorbato en el tiempo t (mg/L)
K_F	Constante del modelo de Freundlich ((mg/g)
K_L	Constante del modelo de Langmuir (L/mg)
H₂BDC	Ácido tereftálico
NH₂-H₂BDC	Ácido aminotereftálico
Fe₃O₄@NH₂-MIL-101(Fe)	Magnetita modificada con MOF de centro de hierro y ácido amino tereftálico
DQO	Demanda Química de Oxígeno
NH₂-MIL-101(Fe)	MOF de centro de hierro y ácido amino tereftálico
q_e	Capacidad de adsorción en el equilibrio
q_t	Capacidad de tartrazina adsorbida en el tiempo t
k₁	Constante de velocidad de adsorción de primer orden
k₂	Constante de velocidad de pseudo-segundo orden
P	Presión de equilibrio
P^o	Presión de saturación del gas

V	Volumen de gas adsorbido
V_m	Volumen de la monocapa de adsorción
C	Constante relacionada con la energía de adsorción de la primera capa en comparación con las siguientes
n	Parámetro de intensidad de adsorción (modelo de Freundlich)
q_m	Cantidad máxima de tartrazina adsorbida en el MOF para formar una monocapa en la superficie (mg/g)
C_e	Concentración de tartrazina en equilibrio (mg/L)
Q_e	Capacidad de adsorción del MOF sobre la tartrazina (mg/g) en el equilibrio
K_L	Constante de adsorción de Langmuir (L/mg)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de la tartrazina (6).....	6
Figura 2. Estructura de NH ₂ -MIL-101(Fe) (12).....	9
Figura 3. Estructura de Fe ₃ O ₄ (15).....	9
Figura 4. Ensayo preliminar de respuesta magnética mediante aproximación de un imán previo al proceso de secado.....	27
Figura 5. MOF obtenido después del proceso de secado a 70 °C.	27
Figura 6. MOF magnético triturado listo para su aplicación.	27
Figura 7. Solución control de tartrazina (amarilla) y solución tratada con MOF magnético (clara) después de 75 minutos de agitación a pH 4.....	28
Figura 8. Espectros FTIR de a) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), b) NH ₂ -MIL-101(Fe), c) NH ₂ -H ₂ BDC y d) Fe ₃ O ₄	29
Figura 9. Espectros FTIR de a) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), b) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe) + tartrazina.	30
Figura 10. Patrones de difracción de rayos X (DRX) para Fe ₃ O ₄ sintetizados por el método de coprecipitación.	31
Figura 11. Patrones de difracción de rayos X para a) NH ₂ -MIL-101(Fe), b) Fe ₃ O ₄ , c) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe).	31
Figura 12. Curva de isoterma de adsorción/desorción de N ₂ (77 K) para a) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe) y b) NH ₂ -MIL-101(Fe).....	32
Figura 13. Región linealizada de la isoterma BET para a) Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe) y b) NH ₂ -MIL-101(Fe)	34
Figura 14. Porcentaje de remoción de la tartrazina a distintos valores de pH, (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 12 ppm de tartrazina y 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4, 5, 6, 7) ...	39
Figura 15. Curvas de adsorción de tartrazina (10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm y 30 ppm) a pH 4.0, utilizando 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe).	39
Figura 16. Isotherma de Langmuir para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe).....	40
Figura 17. Isotherma de Langmuir para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe).....	41
Figura 18. Isotherma de Freundlich para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe).....	42
Figura 19. Efecto del tiempo sobre la capacidad de adsorción de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe) sobre la tartrazina a diferentes concentraciones iniciales (10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm y 30 ppm) a 25 °C. (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH =4.0).....	43
Figura 20. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4.0).....	43
Figura 21. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4.0).....	44
Figura 22. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4.0).....	45
Figura 23. Figura 24. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4.0)	46
Figura 24. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe), pH = 4.0).....	46

Figura 25. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).....	47
Figura 26. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).....	48
Figura 27. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).....	49
Figura 28. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).....	49
Figura 29. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).....	50
Figura 31. Porcentaje de remoción de la tartrazina después de 5 ciclos, (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 12 ppm de tartrazina y 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0).	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de equipos	23
Tabla 2. Lista de reactivos	24
Tabla 3. Resultados obtenidos a partir de las curvas de adsorción-desorción de nitrógeno.	38
Tabla 4. Resultados obtenidos para las isotermas de Langmuir y Freundlich.	42
Tabla 5. Resultados obtenidos para la cinética de adsorción de pseudo-primer orden.	47
Tabla 6. Resultados obtenidos para la cinética de adsorción de pseudo segundo orden.	50

RESUMEN

La contaminación de recursos hídricos por colorantes azoicos, particularmente la tartrazina (E-102), representa un serio problema ambiental debido a su toxicidad, persistencia y potencial carcinogénico. Frente a la necesidad de desarrollar métodos de remoción eficientes y sostenibles, esta investigación se centró en la síntesis, caracterización y evaluación del desempeño de un material adsorbente magnético y nanoporoso: el compuesto $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$. Este material fue diseñado combinando las ventajas de una alta área superficial y funcionalización con grupos amino de las redes metal-orgánico (MOF) $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ con las propiedades magnéticas de la magnetita (Fe_3O_4), lo que facilita su separación posterior al proceso de adsorción mediante la simple aplicación de un campo magnético externo. La síntesis se realizó mediante un método solvotermal, y el material fue caracterizado mediante FT-IR, DRX y BET. Los análisis confirmaron la estructura core-shell deseada, donde las nanopartículas de Fe_3O_4 actúan como núcleo y el MOF forma la cubierta. El análisis BET reveló que el material compuesto posee un área superficial de $56.39 \text{ m}^2/\text{g}$ y un diámetro de poro promedio de 11.39 nm , clasificándolo como mesoporoso, mientras que el MOF sin el núcleo magnético ($\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$) mostró un área mayor de $75.42 \text{ m}^2/\text{g}$, confirmando que la incorporación de la magnetita reduce ligeramente el área superficial. Los ensayos de adsorción demostraron que el $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ es efectivo para la remoción de tartrazina de soluciones acuosas, con una fuerte dependencia del pH del medio. La máxima eficiencia de remoción (57.24%) se obtuvo a pH 4, condición en la que los grupos amino del adsorbente ($-\text{NH}_2$) están protonados ($-\text{NH}_3^+$), generando una superficie cargada positivamente que favorece la atracción electrostática con los grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$) de la molécula de tartrazina, que está cargada negativamente. El estudio de isotermas de adsorción indicó que el proceso se ajusta mejor al modelo de Freundlich mostrando un buen ajuste ($R^2 = 0.9995$), con un parámetro de intensidad de adsorción mayor a 1 ($n = 1.6010$), lo que confirma que el proceso es favorable. El análisis cinético reveló que el mecanismo de adsorción es mejor descrito por el modelo de pseudo-segundo orden ($R^2 \geq 0.9907$ para todas las concentraciones), en comparación con el modelo de pseudo-primer orden. Esto indica que la quimisorción, probablemente mediada por interacciones electrostáticas y formación de

enlaces de hidrógeno entre los grupos amino del MOF y los grupos sulfonato del colorante, es la etapa controlante de la velocidad del proceso. Los valores de la constante cinética k_2 disminuyeron de 5.99×10^{-3} a 1.04×10^{-3} g/mg·min al aumentar la concentración de tartrazina de 10 a 25 ppm, un comportamiento esperado debido a la mayor competencia por los sitios activos disponibles. Los estudios de reutilización mostraron que el material puede ser regenerado y reutilizado, aunque con una pérdida gradual de eficacia; la remoción disminuyó de un 64.09% en el primer ciclo a un rango de 34-38% después de cinco ciclos. Esta pérdida en la capacidad de adsorción se atribuye a una regeneración incompleta de los sitios activos, sugiriendo que protocolos de regeneración más robustos podrían mejorar la estabilidad del material a largo plazo. En conclusión, esta tesis demuestra que el $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ es un adsorbente magnético prometedor y efectivo para la remoción del colorante tartrazina de aguas contaminadas. Su alta eficiencia, especialmente en condiciones ácidas, su separación magnética sencilla y su potencial para ser reutilizado lo convierten en una alternativa atractiva y sostenible para aplicaciones de remediación ambiental.

Palabras claves: Redes metal-orgánicas; tartrazina; remoción de colorante; $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$; adsorción.

ABSTRACT

Water pollution by azo dyes, particularly tartrazine (E-102), represents a serious environmental problem due to its toxicity, persistence, and potential carcinogenicity. In response to the need to develop efficient and sustainable removal methods, this research focused on the synthesis, characterization, and performance evaluation of a magnetic and nanoporous adsorbent material: the $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ composite. This material was designed by combining the advantages of a high surface area and amino functionalization of the metal–organic framework (MOF) $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ with the magnetic properties of magnetite (Fe_3O_4), which facilitates its separation after the adsorption process through the simple application of an external magnetic field. The synthesis was carried out using a solvothermal method, and the material was characterized by FT-IR, XRD, and BET analyses. The results confirmed the desired core–shell structure, where Fe_3O_4 nanoparticles act as the core and the MOF forms the shell. BET analysis revealed that the composite material has a surface area of $56.39 \text{ m}^2/\text{g}$ and an average pore diameter of 11.39 nm , classifying it as mesoporous, while the MOF without the magnetic core ($\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$) showed a higher surface area of $75.42 \text{ m}^2/\text{g}$, confirming that the incorporation of magnetite slightly reduces the surface area. Adsorption experiments demonstrated that $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ is effective for the removal of tartrazine from aqueous solutions, with a strong dependence on the pH of the medium. The maximum removal efficiency (57.24%) was obtained at pH 4, a condition in which the amino groups of the adsorbent ($-\text{NH}_2$) are protonated ($-\text{NH}_3^+$), generating a positively charged surface that promotes electrostatic attraction with the sulfonate groups ($-\text{SO}_3^-$) of the tartrazine molecule, which is negatively charged. The adsorption isotherm study indicated that the process fits best to the Freundlich model, showing an excellent correlation ($R^2 = 0.9995$), with an adsorption intensity parameter greater than 1 ($n = 1.6010$), confirming that the process is favorable. The kinetic analysis revealed that the adsorption mechanism is better described by the pseudo-second-order model ($R^2 \geq 0.9907$ for all concentrations) compared to the pseudo-first-order model. This suggests that chemisorption, likely mediated by electrostatic interactions and hydrogen bonding between the amino groups of the MOF and the sulfonate groups of the dye, is the rate-controlling step of the process. The kinetic constant (k_2) values decreased from

5.99×10^{-3} to 1.04×10^{-3} g/mg·min as the tartrazine concentration increased from 10 to 25 ppm, a behavior expected due to greater competition for the available active sites. Reusability studies showed that the material can be regenerated and reused, although with a gradual loss of efficiency; the removal decreased from 64.09% in the first cycle to a range of 34–38% after five cycles. This loss in adsorption capacity is attributed to incomplete regeneration of active sites, suggesting that more robust regeneration protocols could improve the long-term stability of the material. In conclusion, this thesis demonstrates that $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ is a promising and effective magnetic adsorbent for the removal of the tartrazine dye from contaminated water. Its high efficiency, especially under acidic conditions, simple magnetic separation, and potential for reuse make it an attractive and sustainable alternative for environmental remediation applications.

Keywords: Metal–organic frameworks; tartrazine; dye removal; $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$; adsorption.

I. INTRODUCCIÓN

Con el aumento demográfico y las crecientes demandas socioeconómicas, la mayoría de las industrias emplean colorantes para la tintura de sus productos con mayor frecuencia. A nivel mundial, se producen 700 000 toneladas de colorantes, abarcando aproximadamente 10 000 variedades distintas de colorantes y pigmentos, de los cuales el 12 % son vertidos de manera inadecuada sobre los cuerpos de agua (1). La liberación de efluentes con una alta concentración de colorantes genera una alteración de las propiedades del agua, acelera el proceso de eutrofización y provoca alteraciones para la vida acuática, así como también para la salud pública (2).

Entre los colorantes más comunes se incluye a la tartrazina (E-102) perteneciente al grupo de los colorantes azoicos, el cual es reconocido como uno de los contaminantes más preocupantes debido a su impacto significativo en la salud, así como también, en los ecosistemas acuáticos (3).

La tartrazina se destaca como uno de los colorantes azoicos más propensos a causar reacciones alérgicas, especialmente desencadenando asma en personas con intolerancia a la aspirina. Los síntomas de la hipersensibilidad a este compuesto pueden manifestarse tanto por ingestión como por contacto cutáneo, y abarcan una amplia gama de efectos, desde ansiedad, migraña y depresión, hasta picazón, debilidad, sensaciones de calor o sofocación, aparición de parches de piel púrpura y problemas para conciliar el sueño (4–6). Así también, varios estudios indican que la tartrazina tiende a aumentar la susceptibilidad a la neurodegeneración y acelera la carcinogénesis, ello debido al potencial de estrés oxidativo que tiene el colorante, pues ocurre una producción excesiva de radicales libres en el cuerpo y no hay suficientes antioxidantes para eliminarlos (7).

La tartrazina es un compuesto aromático que presenta grupos funcionales, R_1 , $R_2C=N$ y $R_2-N=N-R_1$ como grupos cromóforos, y ácido sulfónico como grupo auxocromos (8) , los cuales se pueden apreciar en la Figura 1 .Debido a la presencia de grupos

sulfónicos, la tartrazina es un colorante con una elevada solubilidad (260 g/L), favoreciendo su uso en diferentes sectores industriales, tales como, industria de los alimentos, industria textil, industria de los cosméticos, y otros; lo que maximiza la posibilidad de encontrarla como contaminante en efluentes industriales. Debido a su estructura compleja y características xenobióticas, la tartrazina es un compuesto difícil de degradar incrementando la demanda química de oxígeno (DQO) del agua y, en consecuencia, reduce el oxígeno disuelto disponible, afectando negativamente la flora, obstruyendo el crecimiento de organismos acuáticos (6,9).



Figura 1. Estructura química de la tartrazina (6)

Los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales con contenido de tartrazina son principalmente, la coagulación química, la degradación fotocatalítica, el intercambio iónico, la separación por membranas, la degradación electroquímica, los procesos Fenton o foto-Fenton y los métodos de adsorción (6). De todos estos métodos, la adsorción es considerada como la técnica de tratamiento más favorable debido a sus costos modestos, condiciones de operación relativamente sencillos, requisitos mínimos de energía y mano de obra, alta flexibilidad y regeneración de material (10).

Así, en los últimos años las investigaciones se han centrado en el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes, de los cuales, las redes metal-orgánicas (MOFs) han demostrado tener alta capacidad de adsorción de colorantes, debido a su capacidad de ajustar el diámetro de poro y la morfología de superficie, comparado con los materiales convencionales, como son: el carbón activado, los nanotubos de carbono, la zeolita, además, de que estos últimos son poco selectivos (11).

El MIL-101(Fe) es un MOF que tiene como metal al Fe^{+3} (FeCl_3) y como ligando al ácido tereftálico (H_2BDC), esta estructura posee una notable estabilidad estructural, una buena estabilidad en agua y actividad fotocatalítica, así como también estabilidad térmica, lo que le otorga aplicaciones prácticas para la purificación de agua (12). Al reemplazar el ácido tereftálico (H_2BDC) por el aminotereftálico ($\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$) se forma el MOF denominado $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ (Figura 2), el cual ha demostrado una mayor capacidad de adsorción de colorantes, pues, por ejemplo, la eficiencia de eliminación de la rodamina B usando $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ fue notablemente mayor al MIL-101(Fe), con porcentajes máximos de eliminación de aproximadamente de 97.1 % y 88.0 %, respectivamente, para un tiempo de adsorción de 60 minutos (13). Esto demuestra el papel vital tanto de los grupos amino ($-\text{NH}_2$) como del Fe^{3+} en el proceso de adsorción. Asimismo, en la caracterización superficial mediante el método BET, se observó que el MOF $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ presentó una mayor área superficial ($2572.3 \text{ m}^2/\text{g}$) en comparación con MIL-101(Fe), cuya área fue de $2122.6 \text{ m}^2/\text{g}$. Del mismo modo, $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ mostró un rendimiento significativamente superior en la remoción del colorante, logrando más del 99 % de eliminación en solo 5 minutos, mientras que MIL-101(Fe) alcanzó únicamente un 61.2 % en el mismo intervalo de tiempo. Estos resultados reflejan la influencia de la mayor área superficial y la funcionalización con grupos amina en el desempeño catalítico del material (13).

Sin embargo, el uso de los MOFs como adsorbentes presenta limitaciones debido a la dificultad de separación del adsorbente una vez utilizados. La separación del adsorbente normalmente se da utilizando métodos de separación como la filtración y la ultracentrifugación, haciendo con que la aplicación de estos materiales sea más complicada. Una alternativa para superar esta problemática es la incorporación de partículas magnéticas, facilitando la separación del adsorbente mediante el uso de un campo magnético externo. La magnetita es un material ampliamente utilizado, debido a sus propiedades magnéticas, bajo costo, baja toxicidad, y capacidad de reutilización (14). La magnetita es un óxido mixto de hierro con fórmula Fe_3O_4 ,

presenta una estructura altamente paramagnética debido a los espines desapareados que presentan Fe^{+2} y Fe^{+3} provenientes de FeO y Fe_2O_3 , respectivamente, y cuya estructura se observa en la Figura 3 (15).

La formación de la estructura tipo core-shell, conformada por la magnetita y el MOF ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$) facilita la separación del adsorbente de las fases líquidas. Esta formación es posible debido a que los átomos de oxígeno en la superficie de la magnetita pueden formar enlaces coordinativos con los iones de hierro Fe^{3+} presentes en el MOF. Esta interacción de coordinación puede ser particularmente fuerte y selectiva, ya que los iones de Fe^{3+} en el MOF tienen una alta afinidad por los ligandos orgánicos y pueden establecer enlaces coordinativos con los átomos de oxígeno de la magnetita. Además de las interacciones de coordinación, pueden ocurrir interacciones electrostáticas entre la magnetita y el MOF. Además, estudios han demostrado que los MOFs magnéticos formados por Fe_3O_4 y $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, denominados $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, presentan una alta capacidad de adsorción, rápida regeneración y un proceso de separación sencillo para la eliminación de contaminantes, como los fosfatos (16). Por otro lado, se ha evidenciado que el MOF $\text{MIL-101(Fe)}@\text{PDopa}@\text{Fe}_3\text{O}_4$, con características similares, pero con la particularidad de poseer una película muy delgada de 3,4-dihidroxi-L-fenilalanina (L-Dopa) entre las partículas de Fe_3O_4 y MIL-101(Fe) , también presenta una capacidad de adsorción eficiente. Este material logró remover de manera efectiva los colorantes verdes de malaquita y rojo de metilo (este último un colorante azoico), alcanzando eficiencias de remoción del 85.7% y 89.9%, respectivamente (17).

Cabe señalar que, la adsorción de colorantes azoicos en el MOF $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ puede ocurrir a través de una combinación de interacciones de enlace de hidrógeno, enlaces de coordinación e interacciones electrostáticas entre los grupos funcionales del MOF y los grupos funcionales del colorante. Así también debido a que se produce una interacción $\pi - \pi$, $n - \pi$ entre el ligando ácido aminotereftálico ($\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$) del MOF con la colorante tartrazina. Estas interacciones a nivel

molecular son responsables de la afinidad y selectividad del MOF hacia los colorantes azoicos, contribuyendo a su capacidad de adsorción y retención en solución.

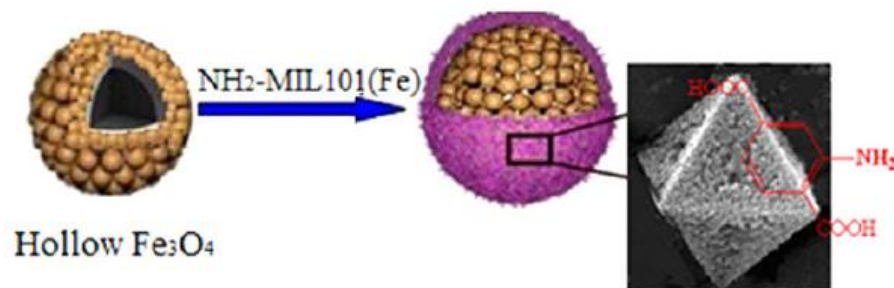


Figura 2. Estructura de $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ (12)

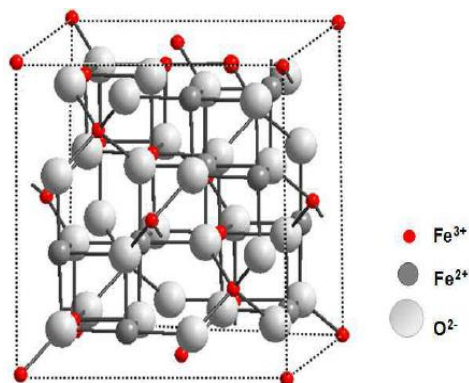


Figura 3. Estructura de Fe_3O_4 (15)

La síntesis del MOF magnético de tipo $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ el cual posee propiedades magnéticas y catalíticas, es una propuesta innovadora y su uso en la remoción de colorantes azoicos, bastante interesante. La composición química, la morfología de la superficie y el patrón de difracción del MOF magnético se confirmarán mediante espectroscopía infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), análisis de área de superficie BET y difracción de rayos X (DRX).

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficacia del MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ en la remoción del colorante azoico tartrazina de muestras acuosas, destacando la facilidad de separación del adsorbente utilizando un pequeño

imán de neodimio. Se investigará la cinética de adsorción del colorante, así como los factores que influyen en la eficiencia de remoción, como el pH y la concentración inicial de contaminante. Además, se explorarán posibles mecanismos de adsorción y se evaluará la reutilización del adsorbente para una mayor sostenibilidad.

Del estudio de la remoción del colorante azoico tartrazina mediante el uso del MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ se espera que los resultados de esta investigación contribuyan significativamente al cuerpo de conocimientos científicos sobre el uso de MOFs en el tratamiento de aguas residuales, y que proporcionen información valiosa para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para la eliminación de colorantes azoicos en las industrias. Además, se espera que este estudio fomente el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales más eficientes y sostenibles.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Adsorción

La adsorción es un proceso en el que moléculas o átomos de gases o líquidos se adhieren a la superficie de un sólido o líquido. Este fenómeno juega un papel crucial en diversas aplicaciones tanto industriales como ambientales, tales como la purificación de gases, la eliminación de contaminantes en aguas residuales y la catálisis heterogénea. Los materiales que se utilizan para llevar a cabo la adsorción de gases o sustancias disueltas se conocen como adsorbentes, y las moléculas que se adhieren a estos se denominan adsorbatos.

Un ejemplo destacado de adsorbente es la zeolita, que se emplea en sistemas de purificación de agua para eliminar iones de metales pesados y otras impurezas disueltas. La adsorción ocurre cuando las moléculas se acumulan en la superficie externa o interna de los sólidos, como en las paredes de capilares o en grietas, así como en la superficie de los líquidos. Es esencial distinguir la adsorción de la absorción, ya que esta última involucra la penetración de una sustancia en el interior

de cristales, bloques de sólidos amorfos o líquidos, en lugar de adherirse únicamente a la superficie.

2.2. Tipos de Adsorción

Las moléculas y los átomos pueden adherirse a las superficies de dos formas principales: la adsorción física y la adsorción química, las cuales difieren en la naturaleza de las fuerzas involucradas y en la energía requerida para que el proceso ocurra (18).

2.2.1. Adsorción física

La adsorción física, también conocida como fisisorción, se produce cuando las moléculas o átomos del adsorbato se adhieren a la superficie del adsorbente mediante fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas son relativamente débiles y, por lo tanto, el proceso es generalmente reversible. La energía involucrada en la fisisorción es baja, típicamente en el rango de 4 a 40 kJ/mol, y no implica cambios significativos en la estructura química del adsorbato ni del adsorbente. Este tipo de adsorción es común en gases a bajas temperaturas y se ve favorecida por un área superficial elevada del adsorbente (18).

2.2.2 Adsorción química

La adsorción química, o quimisorción, implica la formación de enlaces químicos entre las moléculas o átomos del adsorbato y la superficie del adsorbente. Este proceso es altamente específico, y la energía involucrada es significativamente mayor que en la fisisorción, usualmente en el rango de 40 a 800 kJ/mol. Debido a la naturaleza fuerte de estos enlaces, la quimisorción es generalmente irreversible y puede alterar la estructura química del adsorbato. Este tipo de adsorción es particularmente importante en procesos catalíticos, donde la reactividad del adsorbato puede verse aumentada debido a la interacción con la superficie del adsorbente (18).

2.3. Factores determinantes de la adsorción

La eficiencia y capacidad de captación en el proceso de adsorción dependen de una compleja interrelación entre las propiedades del sistema y las condiciones del medio. Por un lado, las características intrínsecas del adsorbato y del adsorbente como una baja solubilidad o una alta polaridad del primero, sumadas a la presencia de grupos funcionales específicos y una elevada área superficial interna en materiales micro y mesoporosos facilitan el acceso molecular y multiplican los sitios activos disponibles para la transferencia de masa (18,19). Por otro lado, las condiciones operacionales regulan drásticamente esta interacción: el pH del medio altera los estados de ionización, la solubilidad del adsorbato y la carga neta de la superficie del adsorbente (19,20), mientras que la temperatura ejerce un efecto dual, desfavoreciendo la fisisorción por el incremento de la energía cinética, pero potenciando inicialmente la quimisorción al proveer la energía de activación necesaria para la formación de enlaces químicos antes de alcanzar el umbral de desorción (19).

2.4. Estructuras de redes metal-orgánicas (MOF's)

Los MOF's se definen como redes cristalinas formadas por enlaces de coordinación entre iones metálicos y ligandos orgánicos. En 1995, se introdujeron los primeros MOFs con porosidad permanente, estableciendo así una nomenclatura estándar para estos materiales. En estos compuestos, los iones metálicos pueden combinarse con ligandos orgánicos como los carboxilatos, así como con otros aniones orgánicos, incluidos compuestos sulfónicos, heterocíclicos y fosfonatos. Es así que, los MOFs han suscitado un gran interés en la comunidad investigadora debido a sus múltiples aplicaciones y potenciales. Entre sus características destacadas se encuentran: la relativa facilidad de síntesis en comparación con las zeolitas, la capacidad de ajustar su superficie y porosidad para crear sitios coordinados insaturados, y su habilidad para mantener la estructura cristalina sin alteraciones(20).

2.4.1. Características de los MOF's como adsorbentes

Los MOFs han despertado un gran interés como materiales adsorbentes debido a la combinación de propiedades que ofrecen. Entre ellas destaca su elevada área superficial y su estructura porosa, las cuales proporcionan una gran cantidad de sitios disponibles para la adsorción de diversas moléculas. Además, la posibilidad de modificar el tamaño y la geometría de sus poros durante la síntesis permite mejorar la selectividad del material hacia determinados compuestos. De igual manera, la amplia variedad de metales y ligandos que pueden emplearse en su preparación hace posible ajustar sus propiedades químicas según la aplicación requerida. Gracias a estas características, los MOFs presentan un buen desempeño en procesos de adsorción y, en muchos casos, conservan su estructura y eficiencia después de varios ciclos de uso, lo que favorece su aplicación en el tratamiento de contaminantes y otros procesos industriales (11).

A pesar de estas ventajas, el comportamiento de los MOFs en medios acuosos depende de la estabilidad de los enlaces que conforman su estructura. La interacción con el agua puede ocasionar el reemplazo de los ligandos o la ruptura de los enlaces entre el metal y el ligando por hidrólisis, afectando la integridad del material y reduciendo su capacidad adsorbente. Sin embargo, esta susceptibilidad varía según la composición del MOF. Aquellos basados en hierro y ligandos carboxilato suelen presentar una mayor resistencia frente a la degradación en agua, debido a que los enlaces metal-ligando son más fuertes, lo que favorece su empleo en procesos de adsorción realizados en soluciones acuosas, como la eliminación de colorantes (20).

2.4.2. Mecanismos posibles de adsorción

El uso de MOF como adsorbentes para la eliminación de contaminantes peligrosos de aguas residuales ha generado un interés considerable. La adsorción puede suceder mediante varios mecanismos, como interacciones

ácido-base, interacciones electrostáticas entre el adsorbato y el adsorbente, enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y apilamiento π - π (20).

2.4.2.1. Interacción electrostática

El fenómeno predominante en la adsorción de sustancias peligrosas de aguas residuales utilizando MOFs (marcos orgánicos metálicos) es la interacción electrostática. La carga superficial del MOF, que se forma cuando el material ajusta su carga neta al interactuar con medios polares como el agua, varía según el pH del entorno. Esta carga neta del MOF puede alterarse mediante protonación y desprotonación. Como resultado, los MOFs con cargas catiónicas o aniónicas tienen una tendencia a interactuar eficazmente con adsorbatos cargados, lo que se denomina interacciones eléctricas (20).

2.4.2.2. Interacción ácido - base

Las interacciones entre ácidos y bases son relativamente infrecuentes en la adsorción de contaminantes en aguas residuales. No obstante, se ha documentado un caso en 2010 donde se observó este tipo de interacción durante la adsorción de un contaminante orgánico utilizando un MOF en particular. Se trató del MOF MIL-101-Cr que había sido modificado con grupos funcionales ácidos y básicos. Esta estructura demostró ser un adsorbente efectivo para la eliminación tanto del clofibrato como del naproxeno. Sin embargo, dada la incorporación de grupos ácidos SO_3H y grupos básicos primarios NH_2 en el MOF, se intensificó la interacción ácido-base entre el MOF y los contaminantes; de modo que, el MOF modificado con el grupo NH_2 presentó una capacidad de adsorción superior en comparación con el MOF sin modificaciones; sin embargo, el MOF con grupos SO_3H exhibió una capacidad de adsorción menor (20).

2.4.2.3. Interacción puente de hidrógeno

Se ha observado durante los procesos de adsorción de sustancias peligrosas que el MOF interactúa con los contaminantes mediante la formación de enlaces de hidrógeno, especialmente en compuestos

orgánicos. Es así por ejemplo, que Liu Baojain y sus colaboradores en 2014 estudiaron cómo el p-nitrofenol se adsorbe del agua utilizando diferentes MOFs como MIL-100-Fe, MIL-100-Cr y NH₂-MIL-101-Al de donde se destacó este último hasta con 4.3 veces más que el MIL-100-Fe y 1.9 veces más alta que la de MIL-100-Cr. Ello se explica justamente por los puentes de hidrógeno formados entre el p-nitrofenol y los grupos amino presentes en NH₂-MIL-101-Al (20).

2.4.2.4. Interacción π - π

La interacción π - π juega un papel en la adsorción de contaminantes orgánicos en los MOFs. Sin embargo, durante la adsorción de aguas residuales, las interacciones de apilamiento π - π predominan sobre la complexación. Tal es que, la investigación que hizo Khalid Mohd demostró que un polímero de coordinación basado en Cu (II) llamado CP adsorbió casi el 98%, 92,8% y 95% de los colorantes orgánicos MB, MO y Rh-B y según ellos se debió al mecanismo de las fuertes interacciones π - π ; ello entre el anillo de benceno de CP 1 y las cadenas principales aromáticas de los colorantes orgánicos (21).

2.4.2.5. Interacción hidrofóbica

Por lo general, los compuestos hidrófobos son moléculas no polares y de baja solubilidad, con largas cadenas de carbono. Las interacciones hidrófobas suelen ocurrir cuando la adsorción se lleva a cabo en una fase acuosa (20)

2.5. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción son muy útiles para predecir la distribución del adsorbato entre la fase líquida y sólida del adsorbente en condiciones de equilibrio y también ayudan a optimizar el adsorbente en diferentes variables de proceso (22). Por ello, para cuantificar la capacidad máxima de adsorción del adsorbente con respecto a la eliminación de tartrazina, los datos de sorción se trataron con modelos de isoterma, incluidos Langmuir y Freundlich.

2.5.1. Isoterma de Langmuir

Las isotermas de Langmuir se basan en la hipótesis de adsorción de tartrazina en la superficie del MOF, donde existe una adsorción monocapa. La adsorción puede tener lugar en un número determinado de sitios activos distintos, idénticos y equivalentes. Además, no existe contacto lateral ni barrera estérica entre las moléculas de colorante adsorbidas. Es importante señalar que este modelo teórico es válido para la interfase sólido – líquido como sólido – gas (23).

La ecuación de Langmuir se expresa como:

$$C_e = \frac{q_e(1 + K_c \cdot C_e)}{q_m \cdot K_c} \quad \text{Ec. 1}$$

La forma lineal de la ecuación, utilizada para ajustar datos experimentales, es:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad \text{Ec. 2}$$

O también expresado de la otra forma:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{(K_L \cdot q_m)} \cdot \frac{1}{C_e} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

q_m : Cantidad máxima de tartrazina adsorbida en el MOF para formar una monocapa en la superficie (mg/g)

C_e : Concentración de tartrazina en equilibrio (mg/L)

q_e : Capacidad de adsorción del MOF sobre la tartrazina (mg/g) en el equilibrio,

K_L : Constante de adsorción de Langmuir (L/mg).

Entonces, el modelo indica en primera instancia que, cada sitio puede ser ocupado por una sola molécula de adsorbato, formando así una monocapa sin posibilidad de adsorción adicional sobre las partículas ya fijadas. Asume que no existen interacciones entre las moléculas adsorbidas, y que la energía de adsorción permanece constante durante todo el proceso, siendo independiente tanto del sitio como del grado de cobertura superficial. Por último, se

considera que la adsorción solo puede producirse en aquellos sitios que estén libres, pues una vez ocupado un sitio, este se vuelve inaccesible (23).

Así también, para evaluar la adsorción según la forma de la isoterma, se utiliza el parámetro de equilibrio o parámetro de Langmuir (R_L), que indica cuán favorecida se encuentra el proceso de adsorción y debe ser calculado en la amplitud de las concentraciones iniciales (C_i) del proceso (23).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

C_i : concentración inicial del adsorbato (mg/L)

K_L : constante de Langmuir (L/mg)

R_L : Parámetro de Langmuir

Del análisis de la isoterma sobre los valores de R_L se indica que:

Si $R_L = 0$ el proceso es irreversible

Si $0 < R_L < 1$ el proceso es favorable

Si $R_L > 1$ el proceso es desfavorable

2.5.2. Isoterma de Freundlich

El modelo de Freundlich, comparado con el descrito anteriormente, describe una adsorción heterogénea en superficies con diferentes niveles de energía, permitiendo la formación de múltiples capas de adsorbato. Esta formulación empírica es especialmente útil para sistemas en los que los sitios activos no son equivalentes y donde las interacciones adsorbato-adsorbente pueden variar. Se define con la siguiente ecuación(23).

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n_F}} \quad \text{Ec. 5}$$

La ecuación en forma lineal se representa a continuación:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

q_e : Cantidad de tartrazina adsorbida en el equilibrio (mg/g)

C_e : Concentración de tartrazina que está presente en el medio acuoso en equilibrio (mg/L)

n : Grado de favorabilidad de la adsorción

K_F : Constante de equilibrio de Freundlich correlacionada a la capacidad de adsorción (mg/g)

Donde K_F y n son constantes que varían según las propiedades del adsorbato, del adsorbente y la temperatura. El valor de $1/n$ indica la intensidad del proceso de adsorción: si $1/n$ (pendiente de la recta) es menor que 1, la adsorción se considera favorable, mientras que, si supera la unidad, sugiere que las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente son débiles(23).

2.6. Cinética de adsorción

2.6.1. Cinética pseudo- primer orden (Lagergren)

El modelo cinético pseudo-primer orden, formulado originalmente por Lagergren (1898), supone que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia entre la capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e) y la adsorbida en el tiempo t (q_t). La expresión diferencial es (23):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{Ec. 7}$$

Integrando con las condiciones $q_t = 0$ en $t = 0$ y $q_t = q_e$ en t , se obtiene la forma linealizada:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad \text{Ec. 8}$$

Donde k_1 es la constante de velocidad de adsorción de primer orden. En la práctica, este modelo se aplica principalmente a procesos de físico-adsorción rápidos en etapas iniciales. Sin embargo, tiende a no ajustarse bien cuando la cinética es compleja o está limitada por difusión interna, ya que asume que todos los sitios adsorbentes reaccionan por igual y que el equilibrio q_e constante conocido (24).

2.6.2. Cinética pseudo- segundo orden (Ho y McKay)

El modelo pseudo-segundo orden, propuesto por Ho y McKay (1999), considera que la velocidad de adsorción depende del cuadrado de los sitios vacantes:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)^2 \quad \text{Ec. 9}$$

Al integrar esta ecuación entre $q_t=0$ en $t=0$ y $q_t = q_e$ en t , se obtiene la forma linealizada:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde k_2 (g/mg.min) es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden (y). De esta ecuación se puede calcular la capacidad de equilibrio q_e ajustando una gráfica de t/q_t versus t . En este modelo suele interpretarse que la adsorción implica quimiosorción (interacción fuerte con sitios activos), aunque en la práctica su uso es principalmente empírico (24).

2.7 Técnicas de caracterización de MOF

Para comprender y optimizar las propiedades de los materiales MOF, se emplean tres técnicas principales de caracterización con propósitos específicos: en primer lugar, la **Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)** se utiliza para la identificación cualitativa

de compuestos, la detección de impurezas o solventes residuales, y el estudio de interacciones químicas mediante la identificación de sus grupos funcionales (25,26). En segundo lugar, el **Análisis BET** se aplica fundamentalmente para determinar el área superficial específica de estos sólidos porosos y clasificar su distribución y diámetro de tamaño de poro, propiedades críticas para su capacidad de adsorción (18,27). Finalmente, la **Difracción de Rayos X (DRX)** se utiliza para estudiar la estructura del material, permitiendo identificar la fase cristalina a través de la ley de Bragg (28), evaluar el orden estructural y estimar el tamaño promedio de los cristales mediante la ecuación de Scherrer para correlacionarlo con su rendimiento (29).

III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

El MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ actuará como un eficiente adsorbente bajo condiciones óptimas de adsorción, tales como pH de la solución, concentración del adsorbente y tiempo de contacto, para la remoción del colorante azoico tartrazina (E-102) de muestras acuosas.

3.2. Objetivos:

3.2.1. Objetivo general:

Sintetizar el MOF magnético tipo $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ para su uso en remoción del colorante tartrazina (E-102) de muestras acuosas.

3.2.2. Objetivos específicos:

- Sintetizar las nanopartículas de magnetita Fe_3O_4 .
- Sintetizar el MOF magnético tipo $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$.
- Caracterizar el MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ mediante las técnicas BET, FT-IR y DRX.
- Evaluar la capacidad de adsorción del MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ mediante pruebas de adsorción del colorante tartrazina (E-102) en muestras acuosas bajo diferentes condiciones de pH, concentración y tiempo de contacto.
- Evaluar la capacidad de reutilización del MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales y equipos

4.1.1. Materiales en estudio

4.1.1.1. Adsorbente

Se utilizará como adsorbente al MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$.

4.1.1.2. Adsorbato

Se utilizará como adsorbato el colorante azoico tartrazina (E-102).

4.1.2. Materiales de laboratorio

- Fiolas de 25 mL, 50 mL y de 100 mL, Clase A
- Matraces erlenmeyer de 150 mL y 250 mL
- Pipetas volumétricas de 10 mL Clase AS
- Pipetas graduadas de 1 mL, 2 mL, 5 mL, 10 mL y 20 mL Clase A/AS
- Vasos precipitados de 100 mL, 250 mL, 400 mL y 1000 mL
- Probetas de 10 mL, 50 mL y 100 mL
- Bureta de 50 mL
- Baguetas de vidrio
- Imanes de neodimio
- Espátulas
- Soporte Universal
- Pastillas de agitación
- Frascos ámbar

4.1.3. Equipos

Tabla 1. Lista de equipos

Equipo	Marca y modelo	Ubicación
Ultracentrífuga	Centurion Scientific Limited Pro Analytical C4000	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Espectrómetro de FT-IR	Shimadzu Prestige-21	Centro de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
Analizador de área de superficie y porosimetría (BET)	Micromeritics modelo Gemini VII	Centro de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
Difractómetro de rayos X (XRD)	BRUKER D2 PHASER	Centro de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
Espectrofotómetro UV-Visible	Thermo Fisher Scientific Genesys 10S UV-Vis	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Balanza analítica	Ohaus PR224ZH/E	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Estufa	TOB-DZF-6050	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Electrodo de pH	Apera Instruments PH700 pH Meter	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Autoclave de acero inoxidable con recubrimiento de teflón	-	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Agitador magnético con control de temperatura.	KYNTEL MI0102003	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Sonicador	Derul-DR-DS20	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA
Agitador de rodillos	DLAB modelo MX-T6-S	Grupo de investigación de electroquímica aplicada - GIEA

4.1.4. Reactivos

Tabla 2. Lista de reactivos

Reactivos	Característica	Marca
Cloruro de hierro (II) tetrahidrato	PA, 99.9 %, sólido incoloro	SIGMA ALDRICH
Cloruro de hierro (III) hexahidratado	p.a. EMSURE ACS, Reag. Ph Eur	MERCK
Etanol	70%	Laboratorio Alkofarma
Ácido clorhídrico	Grado ACS, concentración ~37%. Reactivo esencial para titulación, limpieza química y síntesis inorgánica.	FERMONT
Hidróxido de sodio	en lentejas, p.a. EMSURE	MERCK
Ácido 2-aminotereftálico	99%	SIGMA ALDRICH
Dimetilformamida (DMF)	EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur. anhidro, 99,8%	SIGMA ALDRICH
Tartrazina	Color Amarillo N°5 – Tartrazina	Insuquímica

4.1.5. Instalaciones:

- Las pruebas de adsorción se realizaron en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Electroquímica Aplicada (GIEA), ubicado en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (FC-UNI).
- Las caracterizaciones mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (DRX) y análisis de superficie BET se llevaron a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

4.2. Metodología

4.2.1. Preparación de Fe_3O_4

La magnetita se sintetizó en base a la literatura (30) con algunas modificaciones. Se agregó gota a gota 25 mL de una solución que constaba de 1.28 M de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.64 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y 0.40 M de HCl sobre 250 mL de una solución de 0.90 M de NaOH que se encontraba a 50 °C, bajo un ambiente no oxidante (se utilizó argón para desplazar al oxígeno) y bajo agitación magnética vigorosa (600 rpm). El goteo fue por un periodo de aproximadamente de 45 min. El polvo negro precipitado se aisló aplicando un campo magnético externo, el cual fue posteriormente lavado con agua destilada un mínimo de 4 veces. Finalmente, se utilizó una solución de lavado de 0.01 M de HCl, el cual fue agregado para neutralizar la carga aniónica de la superficie de las partículas obtenidas.

4.2.2. Preparación de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$

Las partículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ se sintetizaron según la bibliografía (31). Las partículas magnéticas se dispersaron en 10 mL de una solución de DMF que contenía $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.0420 g). El proceso de dispersión fue favorecido con ayuda de un ultrasonido por un periodo de 10 minutos como mínimo. Seguidamente, en 20 mL de DMF se agregó 0.0282 g de ácido amino tereftálico, el cual fue disuelto con ayuda de un ultrasonido durante un periodo de 30 min. Seguidamente, la dispersión de 10 mL y la solución de 20 mL fueron transferidas a un reactor hidrotermal, el cual fue calentado a 120 °C durante 24 h. Después de todo el procedimiento anterior, se obtuvo un sólido marrón, el cual fue separado con ayuda de un imán externo, para finalmente poder lavarlo con etanol, un mínimo de 3 veces y luego poder secarlo al vacío a 70 °C.

4.2.3. Procedimiento de adsorción del colorante

En este estudio, se llevó a cabo la adsorción del colorante tartrazina utilizando el MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ como adsorbente. La adsorción se realizó al mezclar cantidades conocidas del adsorbente (0,020 g) con soluciones de tartrazina a diferentes concentraciones (10, 15, 20, 25 y 30 ppm), dichas mezclas fueron agitadas utilizando un agitador de rodillos para asegurar el contacto adecuado. Se investigó la cinética de adsorción para evaluar la velocidad de adsorción del proceso, así como el equilibrio de adsorción para determinar la capacidad máxima de remoción del colorante. Además, se analizaron factores que influyen en la eficiencia de remoción, tales como el pH de la solución y la concentración inicial de tartrazina, con el fin de optimizar las condiciones de adsorción.

4.2.4. Reutilización del adsorbente MOF $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$

Para el ensayo de reutilización, se suspendió una cantidad de 0.020 g de MOF magnético ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$) en una solución de 50 mL con 12 ppm de tartrazina, a un pH de 4.0, el cual fue ajustado utilizando pequeñas cantidades de una solución de NaOH (0.1 M) y HCl (0.1 M). La mezcla fue agitada por un periodo de 210 minutos, tomando medidas de absorbancia cada 30 minutos para poder evaluar el porcentaje de remoción. Una vez culminado el periodo, el material adsorbente fue removido con ayuda de un imán, para posteriormente ser lavado con una solución de etanol al 70 %, hasta observar que la solución etanólica sea incolora. Posteriormente, el material fue secado en una estufa a 70 °C por 17 h. Una vez secado el material, se repitió el procedimiento de adsorción de tartrazina, para así poder examinar la capacidad de adsorción de material virgen y el material reutilizado (32).

V. RESULTADOS

- *Síntesis de los materiales*



Figura 4. Ensayo preliminar de respuesta magnética mediante aproximación de un imán previo al proceso de secado.



Figura 5. MOF obtenido después del proceso de secado a 70 °C.



Figura 6. MOF magnético triturado listo para su aplicación.

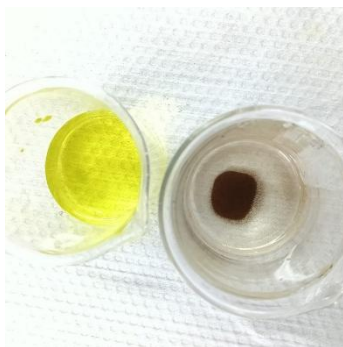


Figura 7. Solución control de tartrazina (amarilla) y solución tratada con MOF magnético (clara) después de 75 minutos de agitación a pH 4.

- ***Caracterización del material adsorbente $Fe_3O_4@NH_2$ -MIL-101(Fe)***

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para la caracterización por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), se empleó un espectrómetro Shimadzu Prestige-21, conocido por su alta precisión, estabilidad y flexibilidad para análisis en laboratorio. Los materiales fueron medidos de forma directa utilizando una celda de Reflexión Total Atenuada (ATR), la cual permitió hacer barridos en el rango de 650 a 4000 cm^{-1} .

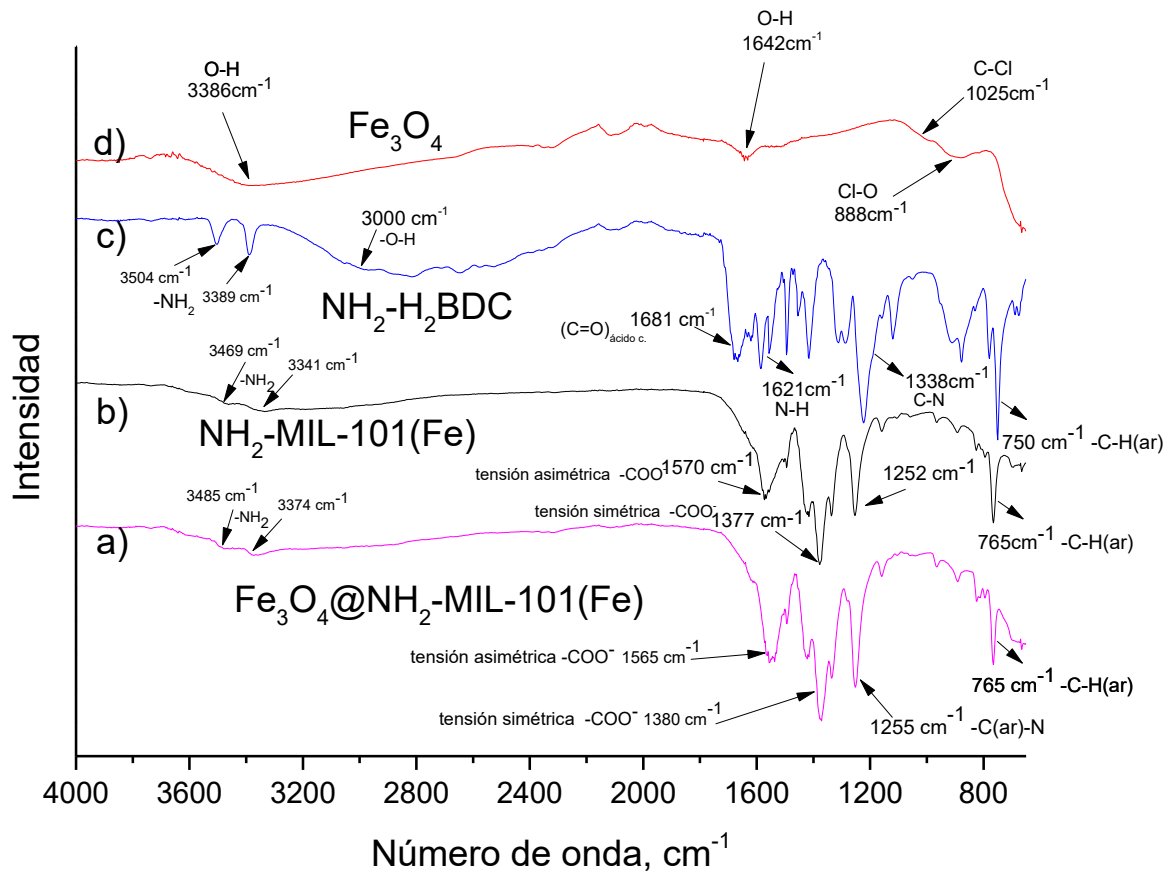


Figura 8. Espectros FTIR de a) $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, b) $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, c) $\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$ y d) Fe_3O_4 .

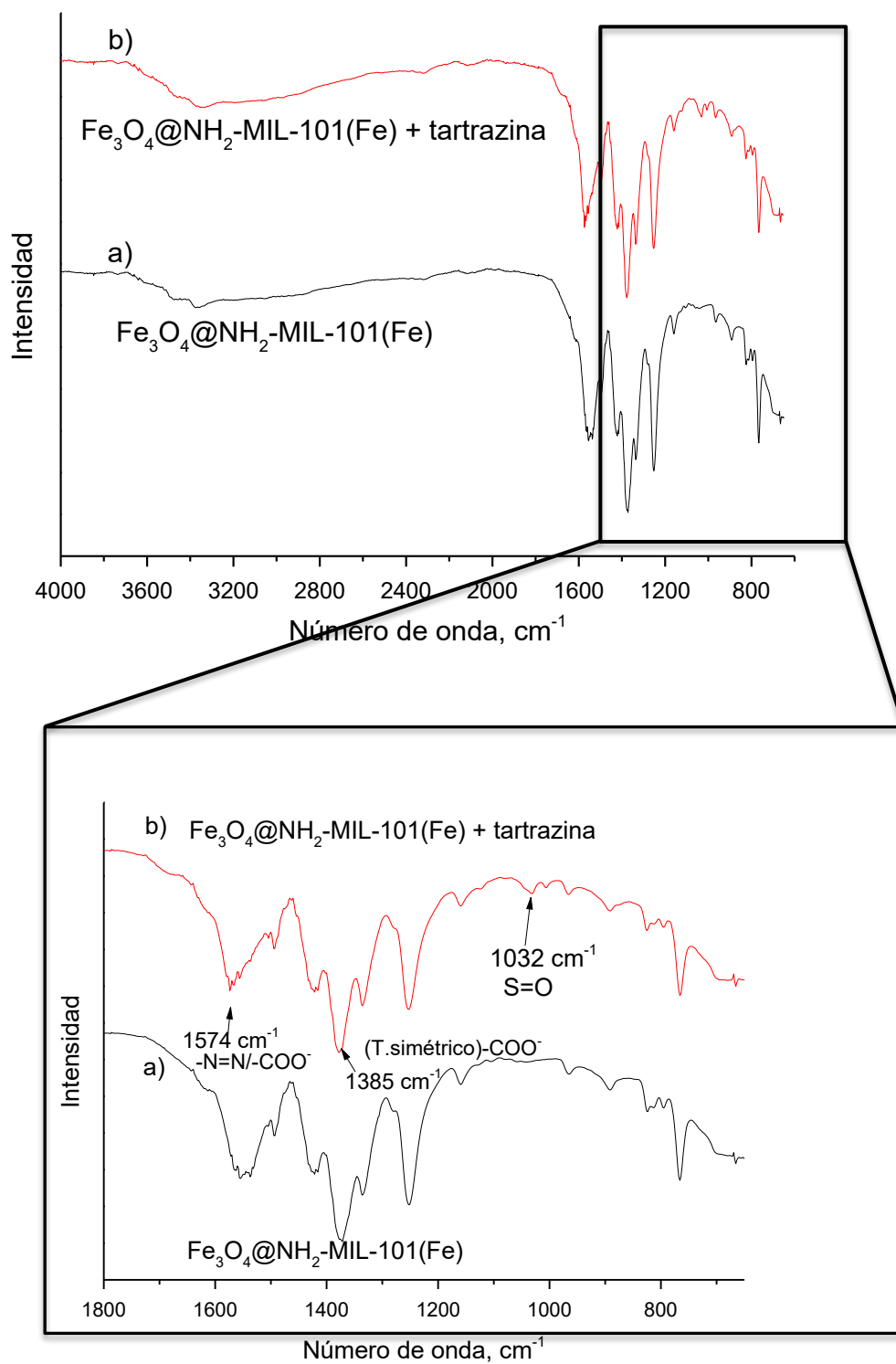


Figura 9. Espectros FTIR de a) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, b) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)} + \text{tartrazina}$.

Difracción de Rayos X (DRX)

La fase cristalina de las nanopartículas de Fe_3O_4 , $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ y $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ fueron identificados por difracción de rayos X (DRX) mediante un difractómetro BRUKER D2 PHASER con radiación $\text{K}\alpha_1\text{-Cu}$ ($\lambda = 0,15406 \text{ nm}$) a 40 kV y 40 mA.

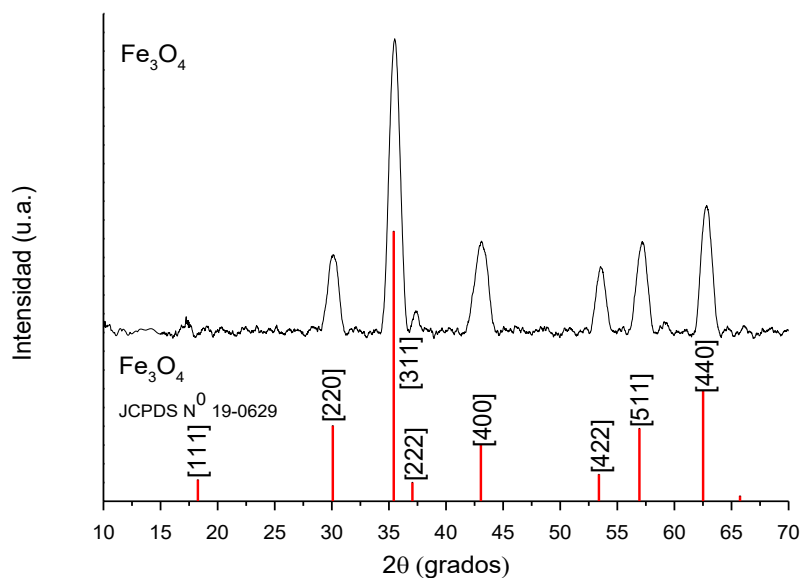


Figura 10. Patrones de difracción de rayos X (DRX) para Fe_3O_4 sintetizados por el método de coprecipitación.

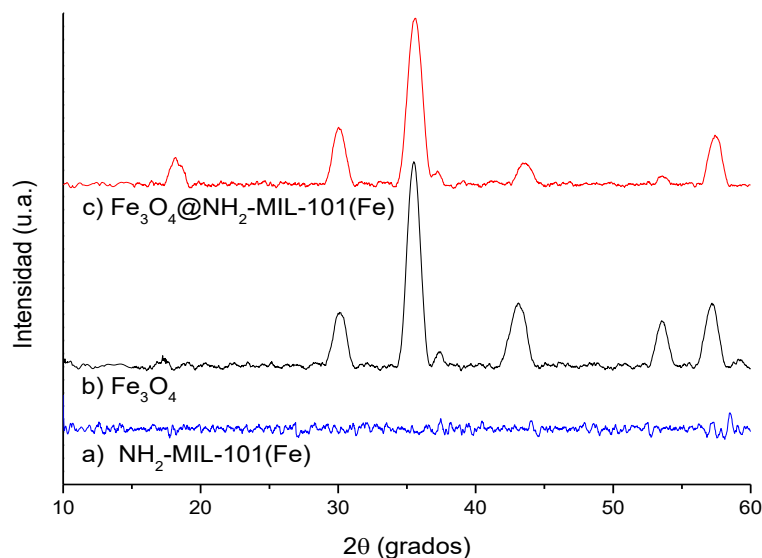


Figura 11. Patrones de difracción de rayos X para a) $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, b) Fe_3O_4 , c) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$.

Análisis BET (Brunauer-Emmett-Teller)

El análisis de adsorción de nitrógeno por el método Brunauer-Emmett-Teller (método BET) fue realizado con la finalidad de poder evaluar el área superficial del material adsorbente, así como también el tamaño de poro. Para ello se utilizó un analizador de área superficial Micromeritics modelo Gemini VII, como gas se utilizó nitrógeno al 99 % de análisis y nitrógeno líquido como refrigerante. Previo al análisis, 50 mg del material adsorbente fue pesado y luego desgasificado a 110 °C en una atmosfera de He durante 3 h.

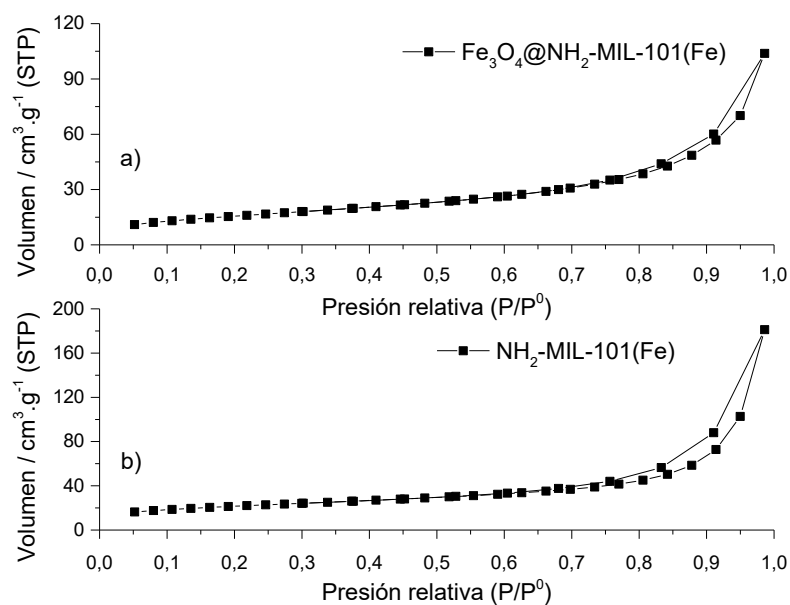


Figura 12. Curva de isoterma de adsorción/desorción de N_2 (77 K) para a) $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$ y b) $NH_2-MIL-101(Fe)$

A partir de los datos de la isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno para $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$ y $NH_2-MIL-101(Fe)$ se calculó el área superficial BET aplicando la Ec. 11. Reacomodando la ecuación:

$$\frac{P/P_0}{V(1 - P/P_0)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} * (P/P_0)$$

Donde:

P/P_0 es la presión relativa,

V es la cantidad adsorbida (cm^3/g STP),

V_m es el volumen de gas adsorbido para formar una monocapa completa (cm^3/g STP),

C es una constante relacionada con la energía de adsorción.

Para linealizar dicha expresión, el rango válido para la aplicación del método BET es de $0.05 \leq P/P_0 \leq 0.35$,

$$\frac{P/P_0}{V(1 - P/P_0)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} * (P/P_0)$$

$$y = b + m * (P/P_0) \quad \text{Ec. 11}$$

Para calcular el área superficial BET, se reemplaza en la siguiente ecuación:

$$S_{BET} = \frac{V_m * N_A * \sigma}{V_{mol}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

V_m es el volumen de gas adsorbido para formar una monocapa completa (cm^3/g STP),

N_A es 6.022×10^{23} moléculas/mol (número de Avogadro),

σ es $0.162 \text{ nm}^2/\text{molécula}$ (área de sección transversal del nitrógeno),

V_{mol} es $22400 \text{ cm}^3/\text{mol}$ (volumen molar a STP).

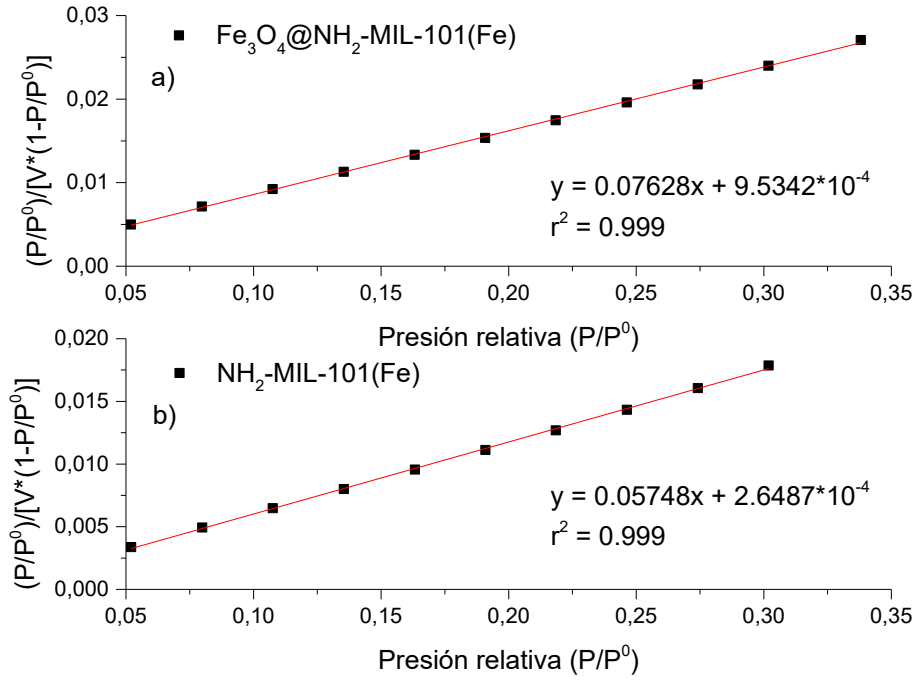


Figura 13. Región linealizada de la isoterma BET para a) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ y b) $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$

A partir de las ecuaciones de recta ($y = mx + b$) (Figura 13) se puede calcular el valor de V_m como:

$$V_m = \frac{1}{m + b} \quad \text{Ec. 13}$$

- Para $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$:

A partir de la Ec. 13, calculamos el valor de V_m :

$$y = 0.07628x + 9.5342 \cdot 10^{-4} \quad V_m = \frac{1}{m+b}$$

$$V_m = \frac{1}{0.07628 + 9.5342 \cdot 10^{-4}}$$

$$V_m = 12.94776 \text{ cm}^3/\text{g STP}$$

Finalmente, reemplazando en la Ec. 12 calculamos el valor de S_{BET} :

$$S_{BET} = \frac{V_m * N_A * \sigma}{V_{mol}}$$

$$S_{BET} = \frac{12.94776 \text{ cm}^3/\text{g} * 6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol} * 0.162 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{moléculas}}{22400 \text{ cm}^3/\text{mol}}$$

$$S_{BET} = 56.3901 \text{ m}^2/\text{g}$$

- Para NH₂-MIL-101(Fe):

A partir de la Ec. 13, calculamos el valor de V_m :

$$y = 0.05748x + 2.6487 * 10^{-4} \quad V_m = \frac{1}{m+b}$$

$$V_m = \frac{1}{0.05748 + 2.6487 \times 10^{-4}}$$

$$V_m = 17.31756 \text{ cm}^3/\text{g STP}$$

Inicialmente, reemplazando en la Ec. 12 calculamos el valor de S_{BET} :

$$S_{BET} = \frac{V_m * N_A * \sigma}{V_{mol}}$$

$$S_{BET} = \frac{17.31756 \text{ cm}^3/\text{g} * 6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol} * 0.162 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{moléculas}}{22400 \text{ cm}^3/\text{mol}}$$

$$S_{BET} = 75.4214 \text{ m}^2/\text{g}$$

También se realizó el cálculo del diámetro de poro promedio (d_p). Para ello, se utilizó la fórmula:

$$d_p = \frac{4 * V_p}{S_{BET}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

d_p diámetro de poro promedio (nm),

V_p volumen total de poros (cm^3/g),

S_{BET} área superficial BET (m^2/g).

Además, se sabe que el valor del volumen total de poros se calcula como:

$$V_p = V_{ads} * \frac{V_{liq}}{V_{mol}} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

V_{ads} es el volumen total adsorbido en condiciones próximas a la saturación ($P/P^0 \approx 0.99$),

V_{liq} es el volumen molar del líquido,

$$V_{liq} = \frac{\text{Masa molecular (g/mol)}}{\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}}$$

$$V_{liq} = \frac{28 \text{ g/mol}}{0.808 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_{liq} = 34.653 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

V_{mol} es el volumen molar del gas a STP

$$V_{mol} = 22400 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

- Cálculo del tamaño de poro promedio para $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$:

Reemplazamos en la Ec. 15, calculamos el valor de V_p :

$$V_p = V_{ads} * \frac{V_{liq}}{V_{mol}}$$

$$V_p = 103.824899310153 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \text{STP} * \frac{34.653}{22400}$$

$$V_p = 0.16062 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

Finalmente, reemplazando Ec. 14 calculamos el valor del diámetro de poro promedio:

$$d_p = \frac{4 * V_p}{S_{BET}}$$

Ajustando la expresión para obtener en nanómetros:

$$d_p = \frac{4 * V_p \left(\frac{cm^3}{g} \right) * 1000}{S_{BET} \left(\frac{m^2}{g} \right)}$$

$$d_p = \frac{4 * 0.16062 \frac{cm^3}{g} * 1000}{56.3901 \frac{m^2}{g}}$$

$$d_p = 11.3934 \text{ nm}$$

- Cálculo del tamaño de poro promedio para NH₂-MIL-101(Fe):

Reemplazamos en la Ec. 15, calculamos el valor de V_p:

$$V_p = V_{ads} * \frac{V_{liq}}{V_{mol}}$$

$$V_p = 181,14913715406 \frac{cm^3}{g} STP * \frac{34.653}{22400}$$

$$V_p = 0.28024 \frac{cm^3}{g}$$

Finalmente, reemplazando Ec. 14 calculamos el valor del diámetro de poro promedio:

$$d_p = \frac{4 * V_p}{S_{BET}}$$

Ajustando la expresión para obtener en nanómetros:

$$d_p = \frac{4 * V_p \left(\frac{cm^3}{g} \right) * 1000}{S_{BET} \left(\frac{m^2}{g} \right)}$$

$$d_p = \frac{4 * 0.28024 \frac{cm^3}{g} * 1000}{75.4214 \frac{m^2}{g}}$$

$$d_p = 14.8626 \text{ nm}$$

Tabla 3. Resultados obtenidos a partir de las curvas de adsorción-desorción de nitrógeno.

Material adsorbente	Área Superficial BET (S_{BET}), m^2/g	Diámetro de poro promedio (d_p), nm
$Fe_3O_4@NH_2$ -MIL-101(Fe)	56.3901	11.3934
NH_2 -MIL-101(Fe)	75.4214	14.8626

- **Ensayos de adsorción del material adsorbente $Fe_3O_4@NH_2$ -MIL-101(Fe)**

Efecto pH

Con la finalidad de poder evaluar cómo afecta el pH sobre la capacidad de adsorción de la tartrazina del adsorbente, se realizaron pruebas a distintos valores de pH (pH = 4.0, 5.0, 6.0 y 7.0), los cuales fueron ajustados utilizando soluciones de NaOH (0.1 M) y HCl (0.1 M). Se seleccionaron valores de pH mayores que 4, puesto que la magnetita tiende a disolverse a valores de pH menores que 3 (33). Las concentraciones de tartrazina fueron monitoreadas con ayuda de equipo UV-Vis, para ello fue necesario construir una curva de calibración, utilizando como longitud de onda máxima (λ_{max}) un valor de 427 nm.

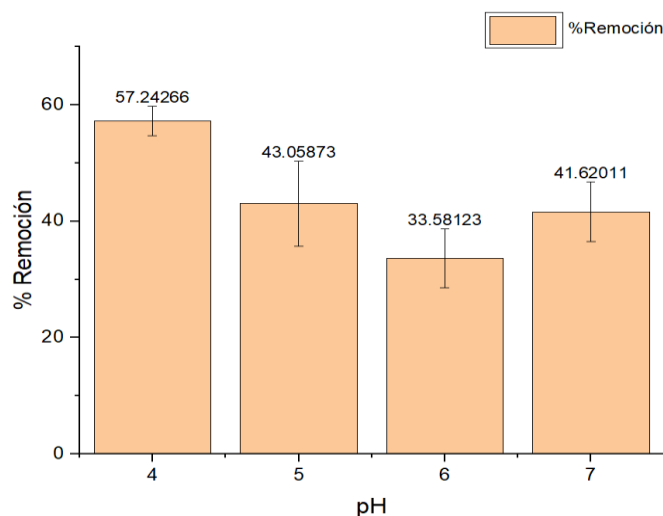


Figura 14. Porcentaje de remoción de la tartrazina a distintos valores de pH, (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 12 ppm de tartrazina y 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4, 5, 6, 7)

Gráficas de Isotermas

Para obtener las isotermas de adsorción, fueron realizadas las curvas de adsorción de la tartrazina sobre el $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$. Para ello, se trabajó a un valor de pH óptimo (pH = 4, previamente obtenido), con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ como material adsorbente, y se varió la concentración inicial de tartrazina en un rango de 10 a 30 ppm. Al igual que en el estudio del efecto del pH, las concentraciones de tartrazina a lo largo del tiempo fueron calculadas mediante un análisis espectrofotométrico.

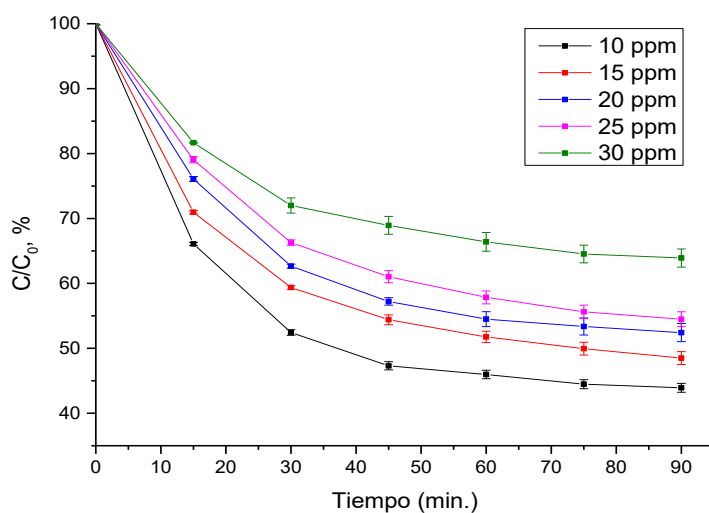


Figura 15. Curvas de adsorción de tartrazina (10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm y 30 ppm) a pH 4.0, utilizando 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$.

Isoterma de Langmuir (primera forma)

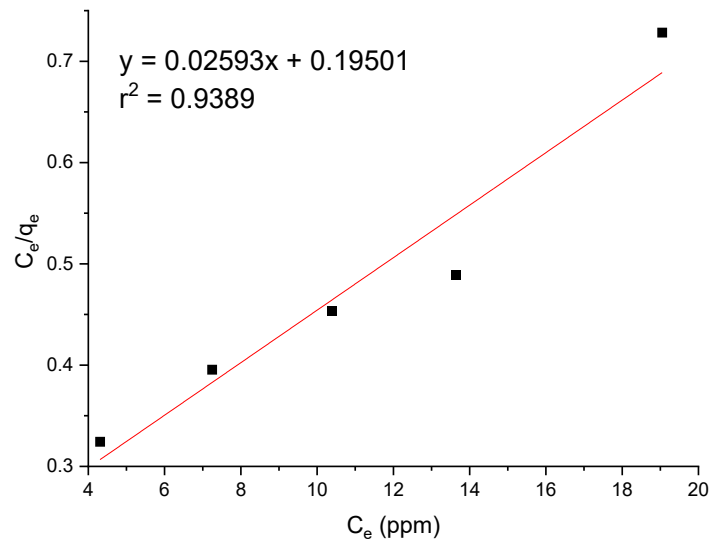


Figura 16. Isoterma de Langmuir para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$.

Reemplazando en la Ec. 2:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{(K_L * Q_m)} + \frac{1}{Q_m} C_e \quad (\text{ecuación de la isoterma de Langmuir})$$

$$y = 0.02593x + 0.19501$$

Podemos calcular los valores de K_L y Q_m

$$\frac{1}{Q_m} = 0.02593$$

$$Q_m = 38.5654 \text{ mg/g}$$

$$\frac{1}{(K_L * Q_m)} = 0.19501$$

$$K_L = 0.1330 \text{ L/mg}$$

Isoterma de Langmuir (segunda forma)

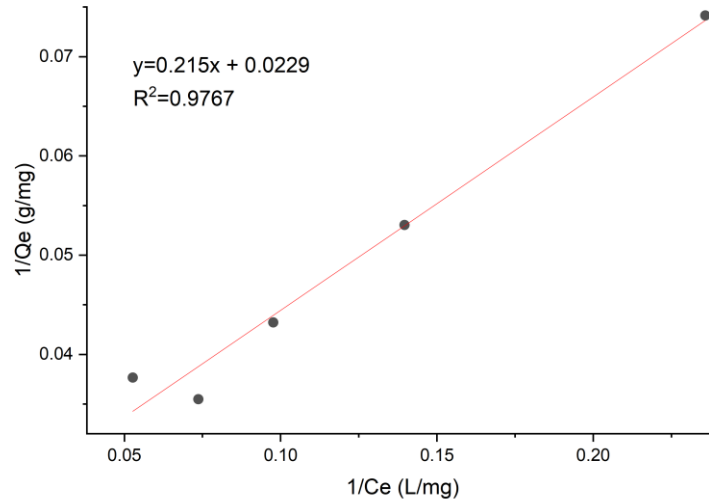


Figura 17. Isoterma de Langmuir para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$.

Reemplazando en la Ec. 3:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{(K_L * q_m)} * \frac{1}{C_e} \quad (\text{ecuación de la isoterma de Langmuir})$$

$$y = 0.215x + 0.0229$$

Podemos calcular los valores de K_L y Q_m

$$\frac{1}{Q_m} = 0.0229$$

$$Q_m = 43.6681 \text{ mg/g}$$

$$\frac{1}{(K_L * Q_m)} = 0.215$$

$$K_L = 0.1065 \text{ L/mg}$$

Isoterma de Freundlich

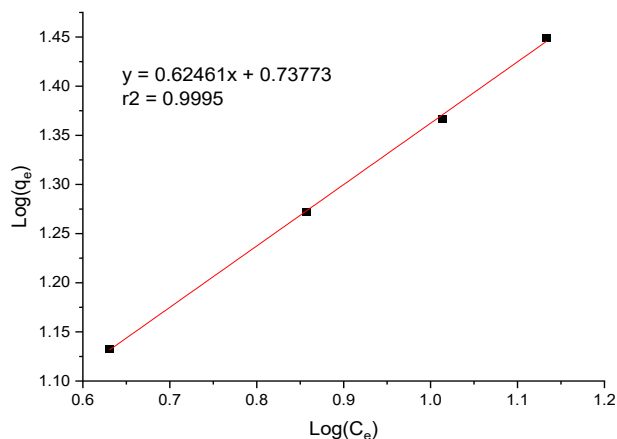


Figura 18. Isoterma de Freundlich para un tiempo de 90 minutos, para un pH de 4.0 y 20 mg de $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$.

Reemplazando en la Ec. 6:

$$\text{Log}(q_e) = \text{Log}(K_f) + \frac{1}{n} \text{Log}(C_e) \quad (\text{ecuación de la isoterma de Freundlich})$$

$$y = 0.62461x + 0.73773$$

Podemos calcular los valores de K_F y n

$$\frac{1}{n} = 0.62461$$

$$n = 1.6010$$

$$\text{Log}(K_F) = 0.73773$$

$$K_F = 5.4668 \left(\frac{mg}{g} \right)$$

Tabla 4. Resultados obtenidos para las isotermas de Langmuir y Freundlich.

Material adsorbente: $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$					
Isoterma	T, °C	Ecuación	$q_m \left(\frac{mg}{g} \right)$	$K_L \left(\frac{L}{mg} \right)$	R^2
Langmuir (1era forma)	25	$y = 0.02593x + 0.19501$	38.5654	0.1330	0.9389
Langmuir (2da forma)	25	$y = 0.215x + 0.0229$	43.6681	0.1065	0.9767
Isoterma	T, °C	Ecuación	n	$K_F \left(\frac{mg}{g} \right)$	R^2
Freundlich	25	$y = 0.62461x + 0.73773$	1.6010	5.4668	0.9995

Cinética de adsorción de pseudo-primer orden

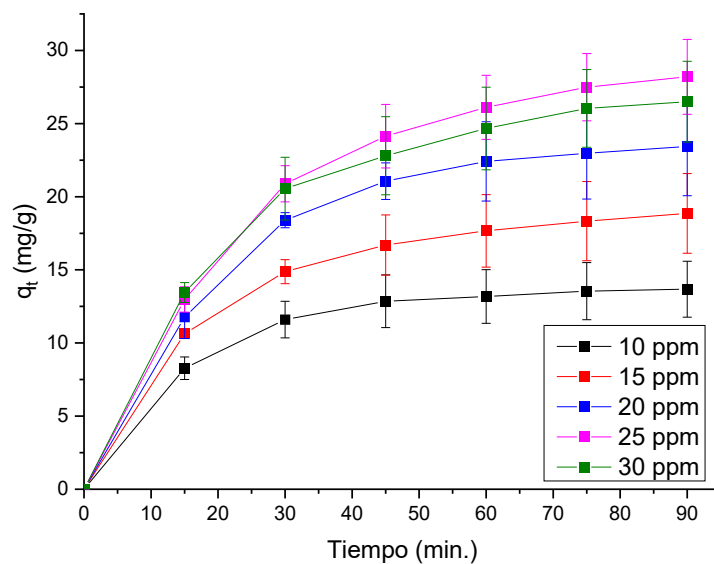


Figura 19. Efecto del tiempo sobre la capacidad de adsorción de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ sobre la tartrazina a diferentes concentraciones iniciales (10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm y 30 ppm) a 25 °C. (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH =4.0)

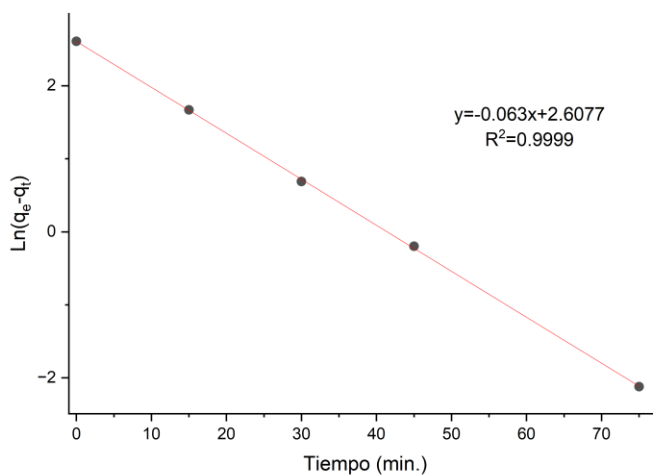


Figura 20. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, pH = 4.0)

Reemplazando en la Ec. 8:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \text{ (ecuación lineal de pseudo primer orden)}$$

$$m = -0.063 = -k_1 \Rightarrow k_1 = 0.063 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln(q_e) = 2.6077 \rightarrow q_e = e^{2.6077} = 13.5678 \text{ mg/g}$$

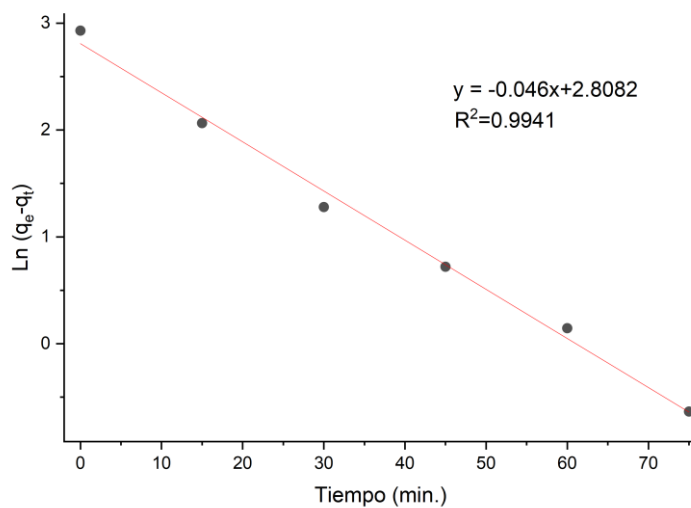


Figura 21. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 8:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \text{ (ecuación lineal de pseudo primer orden)}$$

$$m = -0.046 = -k_1 \Rightarrow k_1 = 0.046 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln(q_e) = 2.8082 \rightarrow q_e = e^{2.8082} = 16.5800 \text{ mg/g}$$

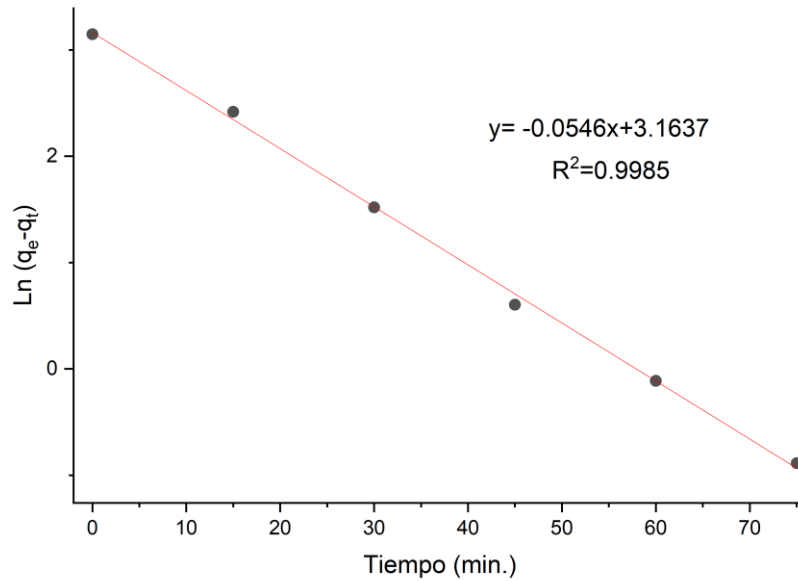


Figura 22. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$, $pH = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 8:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \text{ (ecuación lineal de pseudo primer orden)}$$

$$m = -0.0546 = -k_1 \Rightarrow k_1 = 0.0546 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln(q_e) = 3.1637 \rightarrow q_e = e^{3.1637} = 23.658 \text{ mg/g}$$

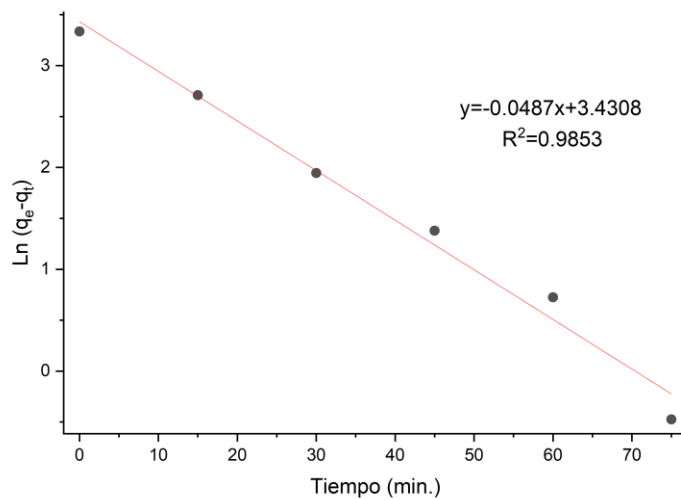


Figura 23. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 8:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \text{ (ecuación lineal de pseudo primer orden)}$$

$$m = -0.0487 = -k_1 \Rightarrow k_1 = 0.0487 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln(q_e) = 3.4308 \rightarrow q_e = e^{3.4308} = 30.9014 \text{ mg/g}$$

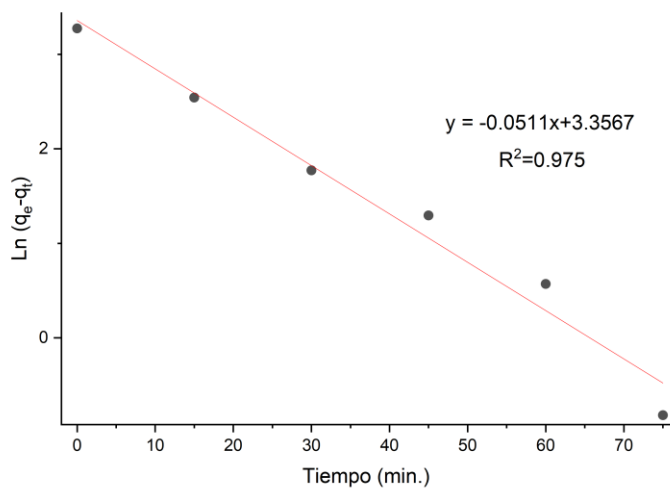


Figura 24. Cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 8:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \text{ (ecuación lineal de pseudo primer orden)}$$

$$m = -0.0511 = -k_1 \Rightarrow k_1 = 0.0511 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln(q_e) = 3.3567 \rightarrow q_e = e^{3.3567} = 28.6943 \text{ mg/g}$$

Tabla 5. Resultados obtenidos para la cinética de adsorción de pseudo-primer orden.

Material adsorbente: Fe ₃ O ₄ @NH ₂ -MIL-101(Fe)					
Concentración de tartrazina, ppm	T, °C	Ecuación	k ₁ (min ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
10	25	y = -0.063x + 2.6077	0.0630	13.5678	0.9999
15	25	y = -0.046x + 2.8082	0.0460	16.5800	0.9941
20	25	y = -0.0546x + 3.1637	0.0546	23.658	0.9985
25	25	y = -0.0487x + 3.4308	0.0487	30.9014	0.9853
30	25	y = -0.0511x + 3.3567	0.0511	28.6943	0.9750

Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden

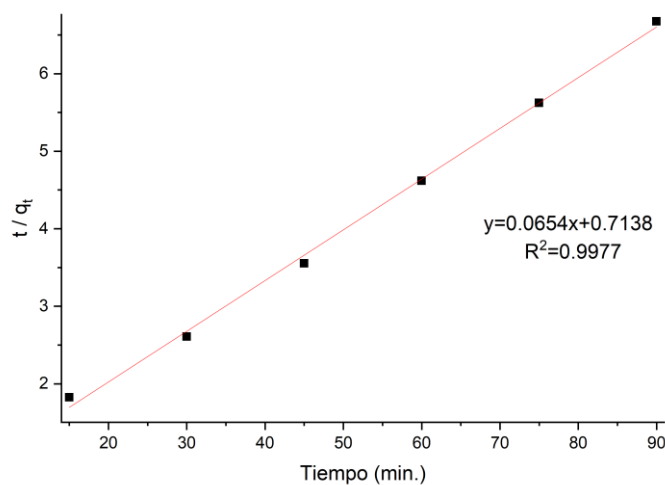


Figura 25. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de Fe₃O₄@NH₂-MIL-101(Fe), pH = 4.0)

Reemplazando en la Ec. 10:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \text{ (ecuación lineal de pseudo segundo orden)}$$

$$q_e = \frac{1}{0.0654} = 15.291 \text{ mg/g} \quad \frac{1}{k_2 q_e^2} = 0.7138$$

$$k_2 = 0.00599 \text{ g/mg}$$

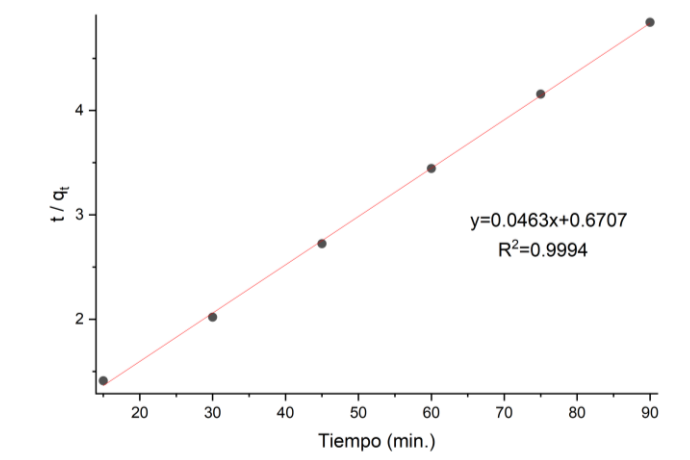


Figura 26. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 10:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \text{ (ecuación lineal de pseudo segundo orden)}$$

$$q_e = \frac{1}{0.0463} = 21.5983 \text{ mg/g} \quad \frac{1}{k_2 q_e^2} = 0.6707$$

$$k_2 = 0.0032 \text{ g/mg}$$

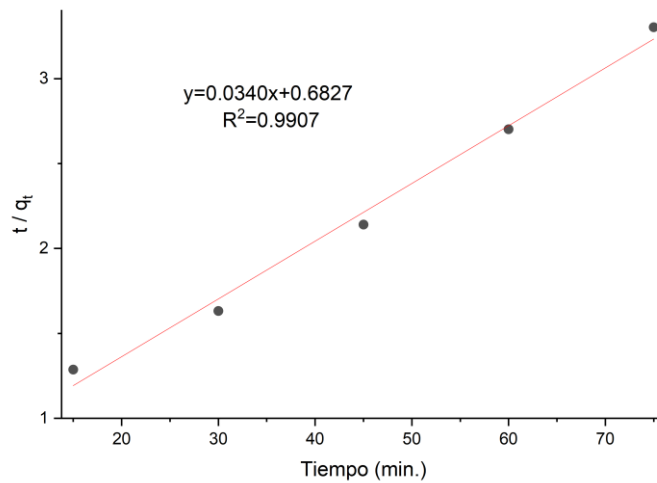


Figura 27. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 10:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{ecuación lineal de pseudo segundo orden})$$

$$q_e = \frac{1}{0.0340} = 29.4118 \text{ mg/g} \quad \frac{1}{k_2 q_e^2} = 0.6827$$

$$k_2 = 0.00173 \text{ g/mg}$$

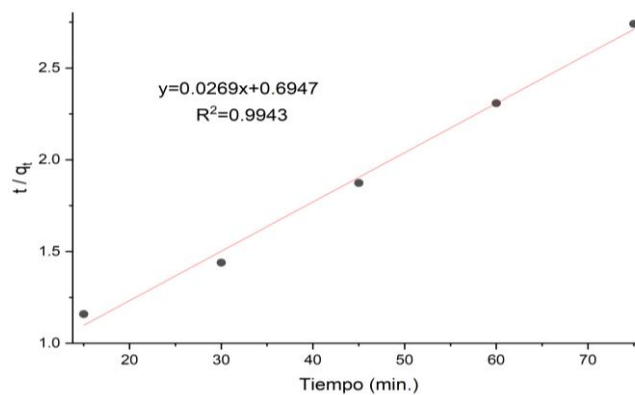


Figura 28. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 10:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{ecuación lineal de pseudo segundo orden})$$

$$q_e = \frac{1}{0.0269} = 37.1747 \text{ mg/g} \quad \frac{1}{k_2 q_e^2} = 0.6947$$

$$k_2 = 0.00104 \text{ g/mg}$$

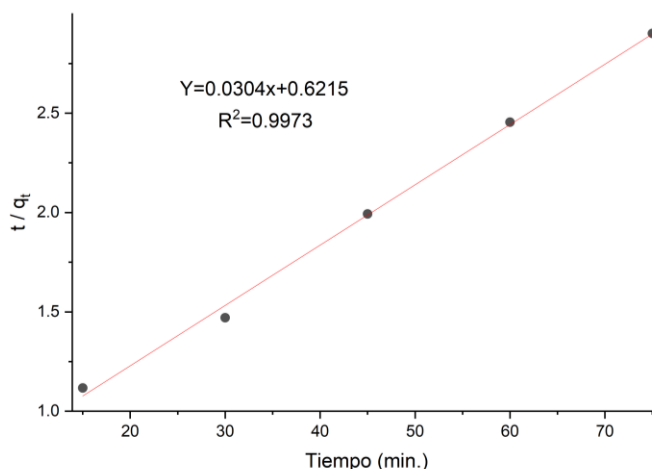


Figura 29. Cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$)

Reemplazando en la Ec. 10:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \text{ (ecuación lineal de pseudo segundo orden)}$$

$$q_e = \frac{1}{0.0304} = 32.8947 \text{ mg/g} \quad \frac{1}{k_2 q_e^2} = 0.6215$$

$$k_2 = 0.00146 \text{ g/mg}$$

Tabla 6. Resultados obtenidos para la cinética de adsorción de pseudo segundo orden.

Material adsorbente: $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$					
Concentración de tartrazina, ppm	T, °C	Ecuación	k_2 ((g/mg)min)	q_e (mg/g)	R^2
10	25	$y = 0.0654x + 0.7138$	0.00599	15.2910	0.9977
15	25	$y = 0.0463x + 0.6707$	0.00320	21.5983	0.9994
20	25	$y = 0.0340x + 0.6827$	0.00173	29.4118	0.9907
25	25	$y = 0.0269x + 0.6947$	0.00104	37.1747	0.9943
30	25	$y = 0.0304x + 0.6215$	0.00146	32.8947	0.9973

Ensayos de reutilización del material adsorbente

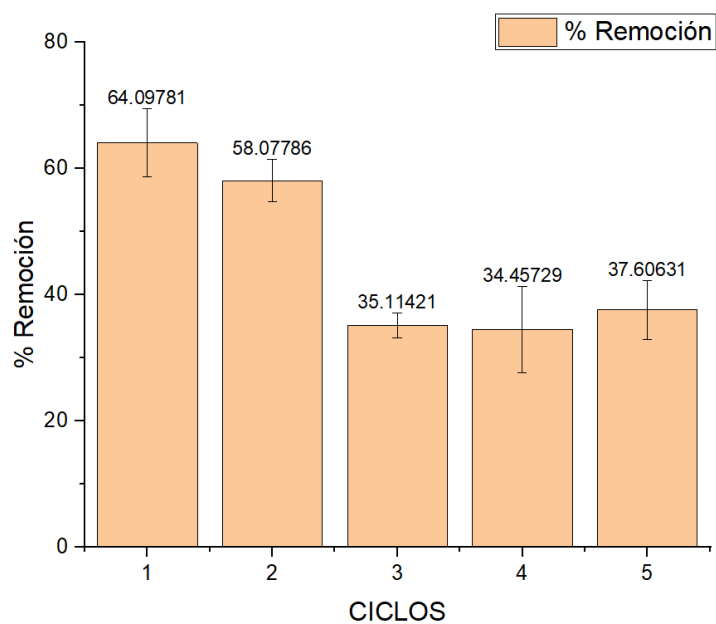


Figura 30. Porcentaje de remoción de la tartrazina después de 5 ciclos, (Condiciones de adsorción: 50 mL de solución con 12 ppm de tartrazina y 20 mg de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, $\text{pH} = 4.0$).

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL MATERIAL ADSORBENTE

En el espectro FTIR mostrado en la Figura 8, se observa el espectro del $\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$, en el cual se destacan los picos característicos a 3389 y 3504 cm^{-1} , que están relacionados con los estiramientos asimétrico ($-\text{NH}_2$) y simétrico ($-\text{NH}_2$) del grupo amino, respectivamente. Además, se identifica una banda ancha alrededor de 3000 cm^{-1} , correspondiente a la vibración del enlace O-H del grupo carboxilo ($-\text{COOH}$), así como una vibración del grupo carbonilo (C=O) a 1681 cm^{-1} (34).

Por otro lado, en el espectro de la magnetita (Fe_3O_4), se observan los picos característicos a 3386 cm^{-1} y 1642 cm^{-1} , los cuales corresponden al grupo O-H (35). Asimismo, se registran dos bandas de absorción alrededor de 1025 cm^{-1} y 888 cm^{-1} , que se asignan a las vibraciones de enlaces entre carbono y oxígeno con cloro (Cl-C y Cl-O). Estos picos sugieren la presencia de impurezas residuales provenientes de los reactivos utilizados en la síntesis, en particular los cloruros de hierro (II) y (III) (36).

Finalmente, en los espectros FTIR del MOF (Figura 8-b) y del MOF magnético (Figura 8-a) se observan bandas de baja intensidad correspondientes al grupo amino ($-\text{NH}_2$). En el MOF, estas se localizan en 3341 cm^{-1} y 3469 cm^{-1} , mientras que en el MOF magnético aparecen en 3374 cm^{-1} y 3485 cm^{-1} . Estas bandas se atribuyen a los estiramientos asimétrico y simétrico del grupo amino, respectivamente. La presencia de estas señales indica que los grupos $-\text{NH}_2$ no participan directamente en la coordinación con los centros metálicos, por lo que permanecen disponibles para establecer interacciones con las moléculas adsorbidas. Además, las bandas en 1570 cm^{-1} y 1377 cm^{-1} , los cuales se asignan a las vibraciones de tensión asimétrica y vibraciones de tensión simétrica del grupo carboxilato ($-\text{COO}^-$), respectivamente, confirman la formación del enlace de coordinación entre el grupo carboxilato y el hierro (III) ($-\text{COO-Fe(III)}$). A partir de la ecuación de Kazuo Nakamoto, la diferencia entre las bandas del carboxilato nos da un valor de 193 cm^{-1} , lo cual corresponde a una coordinación puente, en el que cada oxígeno coordina un metal diferente. En adición, el pico observado a 765 cm^{-1} se asigna a la vibración de flexión fuera del plano del C-H en el anillo de benceno del ligando aminotereftálico. Asimismo, se identifica una banda de absorción a 1250 cm^{-1} , que corresponde al estiramiento C-N de las aminas aromáticas

asociadas a los ligandos tereftálicos funcionalizados. Este hallazgo es comparable con el estudio realizado por Barbosa y su equipo en el análisis de NH₂-MIL-101(Fe) (37).

En la Figura 9 se muestra el espectro FTIR del MOF que se está estudiando en el presente trabajo, es decir, Fe₃O₄@NH₂ - MIL-101(Fe) en (a) y este mismo en presencia del colorante tartrazina en (b). Se vio el espectro similar para ambos casos y como era de esperarse, para el caso (b), se apreció las bandas características del ácido sulfónico en 1032 cm⁻¹ y la del grupo azo (N=N) en 1574 cm⁻¹ lo cual coincide con Saltos (38) que hacen referencia a la tartrazina. Ello hace evidencia a que sí hubo adsorción del colorante en el MOF.

En la Figura 10 se puede observar los patrones de difracción de las nanopartículas de magnetita sintetizadas por el método de coprecipitación. La presencia de los picos de difracción en 2θ igual a 18.27°, 30.09°, 35.42°, 37.05°, 43.05°, 53.39°, 56.94° y 62.51° corresponden a los planos (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511) y (440), respectivamente, los cuales coinciden con los patrones de difracción de la magnetita presentados en la cartilla JCPDS No. 19-0629. No se observan picos distintos de los anteriormente mencionados, lo cual indica la ausencia de impurezas(12). El análisis detallado del ensanchamiento del pico de la reflexión (3 1 1) de Fe₃O₄ utilizando la ecuación de Scherrer indica un tamaño de cristalito promedio de aproximadamente 7.54 nm, lo que sugiere que estas partículas están compuestas de subunidades de nanocristales.

En la Figura 11 se puede observar los patrones de difracción de las nanopartículas de magnetita recubiertas con el MOF NH₂-MIL-101 (Fe) (Fe₃O₄@ NH₂-MIL-101 (Fe)), así como también, del MOF NH₂-MIL-101 (Fe), ambos sintetizados por el método solvotermal. Al igual que en la Figura 10, se destacan los picos característicos de la magnetita, esto debido a que la estructura MOF tipo NH₂-MIL-101 (Fe), presenta picos de poca intensidad para valores de 2θ menores a 20°, y ningún tipo de señal para valores de 2θ mayores a 20°. El análisis detallado del ensanchamiento del pico de la reflexión (3 1 1) de Fe₃O₄@ NH₂-MIL-101(Fe) utilizando la ecuación de Scherrer indica un tamaño de cristalito promedio de aproximadamente 7.54 nm, lo que sugiere que estas partículas también están compuestas de subunidades de nanocristales.

En Figura 12 se pueden observar las curvas de adsorción-desorción de nitrógeno obtenidas a 77 K. La forma general para ambas isothermas muestra una clara presencia de un bucle de histéresis, permitiendo clasificarlas, de acuerdo con la clasificación de la IUPAC, como isothermas de tipo IV, típica de materiales porosos. El rasgo distintivo de las isothermas de tipo IV es la existencia de una región de histéresis atribuida al fenómeno de condensación capilar en los poros durante el proceso de adsorción, y una evaporación retardada durante el proceso de desorción (efecto de la tensión superficial), lo cual se confirma en este caso por la divergencia significativa entre las ramas de adsorción y desorción a presiones relativas intermedias ($0.4 < P/P^0 < 0.9$). La histéresis observada indica que los procesos de llenado y vaciado de los poros no son reversibles, lo cual es característico de materiales con estructuras de poro abiertas o con cuellos estrechos que restringen el desorbe del gas.

A partir de los datos de adsorción de nitrógeno, se evidencia que los materiales $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ y $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ presentan una elevada capacidad de adsorción de gas, con un volumen total adsorbido que alcanza valores de $103.82 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $181.15 \text{ cm}^3/\text{g}$ en condiciones próximas a la saturación ($P/P^0 \approx 0.99$), respectivamente.

La cuantificación del área superficial mediante la aplicación de la ecuación BET en el rango de presiones relativas 0.05 – 0.35, arrojó un valor de $56.3901 \text{ m}^2/\text{g}$ para el $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ y un valor de $75.4214 \text{ m}^2/\text{g}$ para el $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$. Este resultado sitúa al material dentro del rango esperado para adsorbentes mesoporosos sintéticos o modificados. Un área superficial en este orden de magnitud sugiere una estructura bien desarrollada, favorable para aplicaciones en catálisis heterogénea, como soporte de nanopartículas activas, o materiales adsorbentes.

El cálculo del diámetro de poro promedio, utilizando la relación geométrica de $d_p = \frac{4V_p}{S_{\text{BET}}}$, resultó en un valor de 11.3934 nm y 14.8626 nm para el $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ y el $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, respectivamente, indicando que los materiales adsorbentes son materiales mesoporosos (poros entre 2-50 nm según la IUPAC).

ENSAYOS DE ADSORCIÓN

En la Figura 14 se observa que la máxima remoción de tartrazina se alcanza a pH 4 (57.24%), disminuye hasta un mínimo en pH 6 (33.58%) y presenta un leve incremento a pH 7 (41.62%). Esta tendencia indica que el pH influye notablemente en la capacidad de adsorción del material, debido a cambios en la carga superficial del adsorbente y en la especiación del adsorbato. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Yan Li y colaboradores (12), quienes indican que el pH afecta directamente la interacción electrostática entre los grupos funcionales del MOF y los aniones presentes en solución; lo cual exponen en su estudio con la remoción de fosfatos mediante exactamente el mismo MOF $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ en el presente estudio. Este comportamiento también se muestra en el estudio de la remoción de tetraciclina mediante el MOF similar $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ (39).

A pH ácido, particularmente a pH 4, los grupos amino del $\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ están mayormente protonados ($-\text{NH}_3^+$), lo cual confiere una carga positiva a la superficie del material. Esta condición favorece una fuerte atracción electrostática con la tartrazina, que en solución acuosa presenta carga negativa debido a sus grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$). De manera similar, Yan Li y colaboradores (12) encontraron que la adsorción de fosfato fue mayor en medios ácidos debido a la carga positiva de la superficie del MOF, lo que facilitó la interacción con los aniones H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} .

A medida que el pH aumenta hacia la neutralidad, los grupos amino se desprotonan, transformándose en $-\text{NH}_2$, lo que reduce la carga positiva del adsorbente. Este cambio disminuye la atracción electrostática con el anión tartrazina, lo que explica la reducción progresiva en la eficiencia de remoción entre pH 4 y 6. Este efecto también fue observado por Yan Li y colaboradores (12), quienes reportan que la pérdida de protonación del MOF reduce significativamente su capacidad de adsorción a pH altos, debido al debilitamiento de las fuerzas electrostáticas. Así también, la mayor concentración de iones OH^- puede competir con la tartrazina por los sitios activos del adsorbente. Este fenómeno también fue mencionado por (12), quienes señalan que los iones competidores, como OH^- , afectan negativamente la capacidad de adsorción del fosfato, lo cual refuerza la validez de esta interpretación en el presente estudio.

Por otro lado, el ligero incremento de remoción observado a pH 7 podría explicarse por la aparición de interacciones no electrostáticas, tales como enlaces de hidrógeno, interacciones π - π entre los anillos aromáticos del adsorbente y la molécula de tartrazina, o interacciones n - π^* . Aunque estas interacciones no fueron el foco principal en el trabajo de (12), los autores mencionan que, en ausencia de fuerzas electrostáticas predominantes, otras interacciones químicas específicas pueden contribuir a la retención de los aniones, respaldando así la hipótesis de mecanismos complementarios en el sistema que se estudió.

ISOTERMAS DE LANGMUIR Y FREUNDLICH

A los 90 minutos de interacción entre el adsorbato y el adsorbente y a una temperatura de 25°C, el comportamiento de la adsorción de tartrazina sobre $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ fue evaluado mediante los modelos de Langmuir y Freundlich, dichos resultados se expresan en la Tabla 4. El modelo de Langmuir presentó coeficientes de correlación de $R^2 = 0.9389$ y $R^2 = 0.9767$ para su ecuación de primera y segunda forma, respectivamente, mientras que el modelo de Freundlich alcanzó un $R^2 = 0.9995$, evidenciando un mejor ajuste a los datos experimentales. Esto indica que el proceso de adsorción se describe de manera más precisa por el modelo de Freundlich, lo que sugiere una superficie heterogénea y la formación posible de múltiples capas de adsorción.

Los resultados del modelo de Langmuir mostraron una capacidad máxima de adsorción (Q_m) de 38.5654 mg/g y 43.6681 mg/g para la primera y segunda forma de la ecuación, respectivamente, con constantes de afinidad (K_L) de 0.1330 y 0.1065 L/mg. Estos valores reflejan una interacción moderada y estable entre la tartrazina y los sitios activos del material, lo que indica una adsorción eficiente y potencialmente reversible bajo condiciones controladas.

Por otro lado, el modelo de Freundlich presentó parámetros de $n = 1.6010$ y $K_F = 5.4668$ mg/g, lo cual confirma una adsorción favorable ($n > 1$). El valor de $1/n = 0.624$ revela una cierta heterogeneidad superficial, esperable en materiales basados en MOFs funcionalizados con grupos amino. Es así que, estas características facilitan la coexistencia de mecanismos

de interacción electrostática y de enlace de hidrógeno entre los grupos -NH_2 del material y los grupos aniónicos de la tartrazina.

Por ejemplo, las perlas de UiO-66@PVDF , otro material basado en MOFs y también modificado en un soporte polimérico, mostraron una capacidad máxima de adsorción de solo 12.35 mg/g frente a una concentración inicial prácticamente idéntica de 10 mg/L (40). Esta diferencia significativa pone en evidencia la mayor afinidad y eficiencia del material $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ hacia la tartrazina, lo cual puede atribuirse a una mayor densidad de sitios activos accesibles, la funcionalización amino (-NH_2), y posiblemente al efecto sinérgico entre el núcleo magnético (Fe_3O_4) y el marco poroso MIL-101(Fe).

Adicionalmente, si se compara con un segundo material como el MOF Cu-DTO, que presentó un Q_m de 49.8 mg/g frente a una concentración mucho más elevada de 25 mg/L de tartrazina (22), se observa que, aunque el Cu-DTO alcanza una mayor capacidad absoluta, lo hace bajo una condición donde la disponibilidad del adsorbato es considerablemente superior. Este punto es importante porque la eficiencia de adsorción a bajas concentraciones, como en el caso del $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$, es más representativa de aplicaciones reales en el tratamiento de aguas, donde los contaminantes suelen encontrarse en niveles traza o moderados.

CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE PSEUDO-PRIMER ORDEN Y PSEUDO SEGUNDO ORDEN

La evaluación de los modelos cinéticos de adsorción constituye una herramienta fundamental para comprender los mecanismos de adsorción de tartrazina sobre el MOF tipo **$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$** .

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 5, para el caso del modelo de pseudo-primer orden, los coeficientes de correlación lineal (R^2) se mantuvieron relativamente altos en la mayoría de las concentraciones de tartrazina evaluadas, con valores cercanos a la unidad (0.975–0.9999), con un ajuste casi perfecto a 10 ppm ($R^2 = 0.9999$). Sin embargo, una inspección crítica de los valores de capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e) calculados

por este modelo revela una inconsistencia fundamental. Los valores de q_e (13.57, 16.58, 23.66, 30.90 y 28.69 mg/g para concentraciones crecientes) no exhiben una tendencia monótonamente creciente y, de hecho, el valor para 30 ppm es inferior al de 25 ppm. Esta falta de predictividad coherente, a pesar de los altos valores de R^2 , es una limitación bien documentada del modelo de pseudo-primer orden, que a menudo proporciona un buen ajuste sólo para la etapa inicial de la adsorción, pero falla en predecir con precisión el comportamiento en el equilibrio, especialmente en sistemas complejos que involucran materiales porosos funcionalizados. Este comportamiento es consistente con un proceso inicial de saturación de sitios activos de mayor energía seguido por la competencia entre moléculas de colorante en concentraciones más altas (41). Los valores de la constante cinética de pseudo-primer orden (k_1) oscilaron entre 0.046 y 0.063 min^{-1} , sin mostrar una tendencia estrictamente lineal con respecto a la concentración inicial del colorante. Esto indica que, si bien el modelo logra describir con alta fidelidad la evolución temporal de la adsorción en algunos rangos de concentración, su capacidad predictiva en cuanto a los mecanismos dominantes es limitada. De hecho, múltiples estudios han reportado que el modelo de pseudo-primer orden tiende a infraestimar las capacidades de adsorción en equilibrio (q_e) y a sobredimensionar la contribución de interacciones débiles tipo Van der Waals o fuerzas electrostáticas (42,43).

Por otro lado, a partir de los resultados mostrados en la Tabla 6, al aplicar el modelo de pseudo-segundo orden, los resultados muestran una correlación más robusta y consistente con los datos experimentales. Los valores de R^2 se encontraron en un rango estrecho y elevado (0.9907–0.9994), destacando una mayor capacidad del modelo para describir la cinética real de adsorción en este sistema. Además, las capacidades de adsorción calculadas (q_e) fueron mayores que las obtenidas con el modelo de pseudo-primer orden y se ajustan de manera más coherente a la tendencia experimental: 15.29 mg/g a 10 ppm, 21.60 mg/g a 15 ppm, y alcanzando un máximo de 37.17 mg/g a 25 ppm. Este resultado es particularmente relevante, ya que sugiere que el proceso de adsorción de tartrazina sobre $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ involucra interacciones más fuertes, probablemente de tipo químico, como formación de enlaces por intercambio iónico o interacciones electrostáticas específicas entre los grupos amino del material y los grupos sulfonato del colorante (44–46).

La constante cinética de pseudo-segundo orden (k_2) mostró una tendencia decreciente con el incremento de la concentración de tartrazina: desde $5.99 \times 10^{-3} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$ a 10 ppm hasta $1.04 \times 10^{-3} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$ a 25 ppm, con un ligero repunte a $1.46 \times 10^{-3} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$ a 30 ppm. Esta disminución refleja que, a mayores concentraciones iniciales, la velocidad relativa de adsorción se ve limitada por la saturación progresiva de los sitios activos disponibles, lo que es consistente con un proceso controlado por la interacción directa entre el adsorbato y los grupos funcionales del adsorbente. Estudios previos han mostrado tendencias similares, donde un incremento en la concentración del contaminante reduce la eficiencia cinética relativa debido a la mayor competencia por los sitios activos (41).

La comparación de ambos modelos evidencia que el ajuste con el modelo de pseudo-segundo orden no solo presenta mejores correlaciones estadísticas, sino también un mayor sustento químico en función de la estructura del material y la naturaleza del colorante. El material $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ combina una elevada superficie específica y porosidad, propio de los MOF's con funcionalización amino, que favorece interacciones electrostáticas con colorantes aniónicos, como la tartrazina, además de proporcionar propiedades magnéticas que facilitan su recuperación. La presencia de grupos $-\text{NH}_2$ en los MOF's permite la formación de enlaces de hidrógeno y atracciones electrostáticas con los grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$) del colorante, lo que refuerza el papel de procesos tipo quimisorción como mecanismos dominantes (44–46).

Estos resultados se encuentran en concordancia con reportes similares donde materiales magnéticos funcionalizados con grupos amino mostraron altas afinidades por colorantes aniónicos, donde se evaluaron materiales compuestos de MOFs magnéticos funcionalizados y concluyeron que las interacciones dominantes eran de tipo químico, confirmadas por la alta correspondencia de los datos experimentales con el modelo de pseudo-segundo orden (44–48).

ENSAYOS DE REUTILIZACIÓN

El comportamiento de reutilización del material $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ se evaluó bajo condiciones controladas de pH 4, a 25 °C, con una concentración inicial de tartrazina de 12 mg/L y un tiempo de contacto de 90 minutos el cual se aprecia en la Figura 30. Posteriormente, el adsorbente cargado fue regenerado mediante lavado con etanol al 70 % y secado a 70 °C durante 17 h, repitiendo este proceso a lo largo de cinco ciclos consecutivos. En el primer ciclo, el material alcanzó una eficiencia de remoción de 64,1 %, observándose una disminución progresiva en los ciclos siguientes hasta valores cercanos al 35 % en el quinto ciclo. Este descenso evidencia la pérdida gradual de sitios activos y la desactivación superficial del adsorbente a medida que se incrementa el número de reutilizaciones.

El uso de etanol al 70 % como agente regenerante permitió la eliminación parcial de las moléculas de tartrazina retenidas físicamente, aunque su acción resultó limitada frente a las interacciones químicas más fuertes entre los grupos amino ($-\text{NH}_2$) del MOF y los grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$) del colorante (22). Dichas interacciones, de carácter parcialmente irreversible, tienden a persistir incluso tras el lavado, lo que reduce la disponibilidad de sitios activos en los ciclos subsiguientes. Este comportamiento contrasta con estudios previos donde se utilizaron soluciones alcalinas como NaOH 0.5 M en combinación con etanol absoluto, logrando mantener una capacidad de remoción superior al 80 % incluso después de cinco o seis regeneraciones (23).

Por ejemplo, Mohammed et al. (2023) reportaron que las perlas de UiO-66@PVDF conservaron más del 90 % de su capacidad inicial después de cinco ciclos al aplicar una regeneración en NaOH 0.5 M a 323 K durante 1 h, seguida de lavados con etanol y agua destilada (23). De manera similar, El-Desouky et al. (2024) observaron que las partículas de Tb-MOF mantuvieron una pérdida de solo 15 % tras seis ciclos consecutivos, gracias a la sinergia entre el medio alcalino y el etanol, los cuales favorecen la ruptura de enlaces electrostáticos y de hidrógeno entre el colorante y los sitios activos sin alterar la estructura cristalina del material (32). En cambio, el tratamiento exclusivamente con etanol 70 % aplicado al $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ podría haber sido insuficiente para desorber completamente las moléculas atrapadas en los poros internos o unidas mediante intercambio electrónico.

VII. CONCLUSIONES

1. Se logró sintetizar exitosamente el MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ mediante un método solvotérmico tras la obtención previa del núcleo magnético de Fe_3O_4 por coprecipitación. La integración efectiva de la fase MOF y las partículas de magnetita fue confirmada mediante la caracterización por FTIR, DRX y BET, lo que dio como resultado un material que combina grupos funcionales $-\text{NH}_2$ disponibles y propiedades magnéticas que facilitan su rápida separación del medio acuoso.
2. La evaluación termodinámica demostró que la remoción de tartrazina es altamente dependiente del medio, alcanzando un pH óptimo de 4 con una remoción máxima del 57.24% debido a la atracción electrostática entre los grupos $-\text{NH}_3^+$ del adsorbente y los $-\text{SO}_3^-$ del colorante. El proceso se ajustó de manera óptima al modelo de Freundlich ($R^2= 0.9995$), lo que indica una adsorción favorable sobre una superficie heterogénea y en múltiples capas, registrando una capacidad máxima de adsorción de hasta 43.6681 mg/g.
3. El análisis cinético evidenció que el proceso de remoción se rige por el modelo de pseudo-segundo orden (R^2 entre 0.9907 y 0.9994) y que las capacidades de adsorción obtenidas son totalmente coherentes con los datos experimentales. Esto demuestra que el mecanismo principal está dominado por la quimisorción, la cual involucra interacciones químicas específicas, enlaces de hidrógeno e intercambio iónico entre los sitios activos del MOF y el colorante azoico.
4. Los ensayos de reutilización determinaron que, si bien la eficiencia de remoción disminuye progresivamente del 64.1% al 35% tras cinco ciclos consecutivos debido a la saturación y desactivación superficial de los sitios activos, el material mantiene su capacidad de respuesta magnética.
5. En conjunto, los resultados demuestran que el MOF magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{NH}_2\text{-MIL-101(Fe)}$ es un adsorbente eficiente, recuperable y potencialmente aplicable en la remoción de colorantes azoicos como la tartrazina en sistemas acuosos, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas.

VIII. LIMITACIONES

1. El estudio se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio y con tartrazina como único contaminante. Esto limita la extrapolación directa a escenarios reales, donde la variabilidad de temperatura, pH y la competencia iónica de otros contaminantes, colorantes y materia orgánica (efecto matriz) podrían reducir la eficiencia y selectividad del adsorbente.
2. El rendimiento de la síntesis solvotérmica evidenció limitaciones en su escalabilidad, obteniéndose 45 mg en reactores de 30 mL y 508.6 mg en reactores de 200 mL. Dado que esta investigación se desarrolló exclusivamente a nivel de laboratorio y con fines de generación de conocimiento básico, la baja disponibilidad de masa resultante limitó la evaluación del material en sistemas de tratamiento a mayor escala o de operación continua.
3. No se evaluó la estabilidad estructural y química del material híbrido a largo plazo bajo almacenamiento o exposición hídrica continua. La falta de este análisis impide verificar si el material sufre degradación o hidrólisis, lo cual podría explicar la pérdida de eficiencia observada en los ensayos de reutilización.
4. No se identificaron experimentalmente las interacciones químicas de la adsorción ni los enlaces entre el MOF y la magnetita. Aunque los modelos sugieren quimisorción, futuros estudios requieren técnicas avanzadas como XPS (enlaces superficiales), Espectroscopía Raman (vibraciones complementarias) y Potencial Zeta (carga superficial real) para esclarecer los mecanismos a nivel atómico.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Artifon W, Cesca K, de Andrade CJ, Ulson de Souza AA, de Oliveira D. Dyestuffs from textile industry wastewaters: Trends and gaps in the use of biofloculants. *Process Biochemistry*. 2021 Dec;111:181–90. doi:10.1016/j.procbio.2021.10.030
2. Bardone E, Brucato A, Keshavarz T, Spina F, Anastasi A, Prigione V, et al. Biological treatment of industrial wastewaters: a fungal approach. In: Vol. 27. 2012. Available from: www.aidic.it/cet
3. Armağan B, Özdemir O, Turan M, Çelik MS. The removal of reactive azo dyes by natural and modified zeolites. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2003 Jul 1;78(7):725–32. doi:10.1002/jctb.844
4. Choulis NH. Miscellaneous drugs, materials, medical devices, and techniques. In: *Side Effects of Drugs Annual*. Elsevier B.V.; 2010. p. 891–902. doi:10.1016/S0378-6080(10)32049-6
5. Moutinho I, Bertges LC, Assis R. Prolonged use of the food dye tartrazine (FD&C yellow n°5) and its effects on the gastric mucosa of Wistar rats. *Braz. J. Biol.* 2007.
6. Saltos E. C, Chuquer S. D, Pazmiño V. K, Fernández M. L, Pilaquinga F. F. Remoción de tartrazina en agua usando nanopartículas de hierro cerovalentes. *infoANALÍTICA*. 2019 Jul 15;7(2):95–109. doi:10.26807/ia.v7i2.106
7. Amchova P, Siska F, Ruda-Kucerova J. Safety of tartrazine in the food industry and potential protective factors. *Heliyon*. Elsevier Ltd; 2024. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e38111
8. Micheletti DH, da Silva Andrade JG, Porto CE, Alves BHM, de Carvalho FR, Sakai OA, et al. A review of adsorbents for removal of yellow tartrazine dye from water and wastewater. *Bioresource Technology Reports*. Elsevier Ltd; 2023. doi:10.1016/j.biteb.2023.101598
9. Guadalupe M, Morcillo D. TESIS DOCTORAL: Eliminación de colorantes alimentarios en disolución acuosa mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada. 2016.
10. Banerjee S, Chattopadhyaya MC. Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017 May 1;10:S1629–38. doi:10.1016/j.arabjc.2013.06.005
11. Sağlam S, Türk FN, Arslanoğlu H. Use and applications of metal-organic frameworks (MOF) in dye adsorption: Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier Ltd; 2023. doi:10.1016/j.jece.2023.110568
12. Li Y, Xie Q, Hu Q, Li C, Huang Z, Yang X, et al. Surface modification of hollow magnetic Fe₃O₄@NH₂-MIL-101(Fe) derived from metal-organic frameworks for enhanced selective removal of phosphates from aqueous solution. *Sci Rep*. 2016 Jul 29;6. doi:10.1038/srep30651

13. Taha AA, Huang L, Ramakrishna S, Liu Y. MOF [NH₂-MIL-101(Fe)] as a powerful and reusable Fenton-like catalyst. *Journal of Water Process Engineering*. 2020 Feb 1;33. doi:10.1016/j.jwpe.2019.101004
14. de Jesus Andrade Fidelis R, Pires M, de Resende DS, Costa Lima GF, de Paiva PRP, Bezerra AC da S. Magnetite: Properties and applications – A review. *J Magn Magn Mater*. 2025 Feb;614:172770. doi:10.1016/j.jmmm.2025.172770
15. Noval Virginia, Ochoa Cristian, Carriazo José. Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*. 2016 Jun 20;46:42–59. doi:10.15446/rev.colomb.quim
16. Xie Q, Li Y, Lv Z, Zhou H, Yang X, Chen J, et al. Effective Adsorption and Removal of Phosphate from Aqueous Solutions and Eutrophic Water by Fe-based MOFs of MIL-101. *Sci Rep*. 2017 Dec 1;7(1). doi:10.1038/s41598-017-03526-x PubMed PMID: 28607404.
17. Hamed A, Zarandi MB, Nateghi MR. Highly efficient removal of dye pollutants by MIL-101(Fe) metal-organic framework loaded magnetic particles mediated by Poly L-Dopa. *J Environ Chem Eng*. 2019 Feb 1;7(1). doi:10.1016/j.jece.2019.102882
18. Francoise Rouquerol, Jean Rouquerol, Kenneth Sing. *ADSORPTION BY POWDERS & POROUS SOLIDS*. Francia; 1999.
19. Weber J. Walter, Jr. *Control de la calidad del agua Procesos fisicoquímicos*. 2021.
20. Shahnawaz Khan M, Khalid M, Shahid M. What triggers dye adsorption by metal organic frameworks? The current perspectives. *Materials Advances*. Royal Society of Chemistry; 2020. p. 1575–601. doi:10.1039/d0ma00291g
21. Khan MS, Khalid M, Ahmad MS, Shahid M, Ahmad M. Three-in-one is really better: Exploring the sensing and adsorption properties in a newly designed metal-organic system incorporating a copper(II) ion. *Dalton Transactions*. 2019;48(34):12918–32. doi:10.1039/c9dt02578b PubMed PMID: 31389450.
22. Gautam RK, Banerjee S, Sanroman MA, Chattopadhyaya MC. Synthesis of copper coordinated dithiooxamide metal organic framework and its performance assessment in the adsorptive removal of tartrazine from water. *J Environ Chem Eng*. 2017 Feb 1;5(1):328–40. doi:10.1016/j.jece.2016.12.012
23. Singh H, Goyal A, Bhardwaj SK, Khatri M, Bhardwaj N. Highly robust UiO-66@PVDF metal–organic framework beads for tartrazine removal from aqueous solutions. *Materials Science and Engineering: B*. 2023 Feb 1;288. doi:10.1016/j.mseb.2022.116165
24. Revellame ED, Fortela DL, Sharp W, Hernandez R, Zappi ME. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. Elsevier Ltd; 2020. doi:10.1016/j.clet.2020.100032
25. Griffiths PR., De Haseth JA. *Fourier transform infrared spectrometry*. Second. New Jersey: Wiley-Interscience; 2007. 529 p.

26. Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, George S. Kriz. Introduction to Spectroscopy. Third. 2008.
27. Thommes M, Kaneko K, Neimark A V., Olivier JP, Rodriguez-Reinoso F, Rouquerol J, et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015 Oct 1;87(9–10):1051–69. doi:10.1515/pac-2014-1117
28. Villa CL, Cortes JD. DIFRACCIÓN DE RAYOS X: LA FÍSICA, LA INGENIERÍA, Y EL ANÁLISIS DE DIFRACTOGRAMAS.
29. Waseda Y, Matsubara E, Shinoda K. X-Ray Diffraction Crystallography X-Ray Diffraction Crystallography Introduction, Examples and Solved Problems.
30. Alvear D., Galeas S., Guerrero V.H., Debut A. Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita. Revista Politécnica [Internet]. 2017 May [cited 2025 Mar 30];39:61–6. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773641007>
31. Zhao C, Dong P, Liu Z, Wu G, Wang S, Wang Y, et al. Facile synthesis of Fe₃O₄/MIL-101 nanocomposite as an efficient heterogeneous catalyst for degradation of pollutants in Fenton-like system. RSC Adv. 2017;7(39):24453–61. doi:10.1039/c7ra01883e
32. Alaysuy O, Sari AAA, Almahri A, Alrashdi KS, Alatawi ISS, Aljohani MM, et al. Terbium metal–organic frameworks for the efficient removal of tartrazine food dye from aquatic systems: Thermodynamics, kinetics, isotherm, and box-behnken design optimization. Arabian Journal of Chemistry. 2024 Dec 1;17(12). doi:10.1016/j.arabjc.2024.106035
33. Wu H, Yi Q, Li X, Wang Y, Li L. Construction of core-shell magnetic metal-organic framework composites Fe₃O₄@MIL-101(Fe, Co) for degradation of RhB by efficiently activating PMS. RSC Adv. 2024 May 23;14(24):16727–35. doi:10.1039/d3ra08768a
34. Mehri Lighvan Z, Hosseini SR, Norouzbahari S, Sadatnia B, Ghadimi A. Synthesis, characterization, and selective gas adsorption performance of hybrid NH₂-MIL-101(Fe)/ZIF-8 metal organic framework (MOF). Fuel. 2023 Nov 1;351. doi:10.1016/j.fuel.2023.128991
35. Bui TQ, Ton SNC, Duong AT, Tran HT. Size-dependent magnetic responsiveness of magnetite nanoparticles synthesised by co-precipitation and solvothermal methods. Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2018 Mar 1;3(1):107–12. doi:10.1016/j.jsamd.2017.11.002
36. Morales, Sagredo ;, Vicente, Torres ;, Teobaldo, Márquez ;, et al. Characterization of magnetite nanoparticles synthesized by the coprecipitation method. Revista Ciencia e Ingeniería. 2019.
37. Barbosa ADS, Julião D, Fernandes DM, Peixoto AF, Freire C, de Castro B, et al. Catalytic performance and electrochemical behaviour of Metal–organic frameworks:

- MIL-101(Fe) versus NH₂-MIL-101(Fe). *Polyhedron*. 2017;127:464–70. doi:10.1016/j.poly.2016.10.032
38. Q.C.B. AMY GALILEA ROCHA MIRANDA. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS POLIMÉRICAS PARA REMOVER EL COLORANTE TARTRAZINA. México; 2023 Jul.
 39. Luo Y, Su R. Preparation of NH₂-MIL-101(Fe) Metal Organic Framework and Its Performance in Adsorbing and Removing Tetracycline. *Int J Mol Sci*. 2024 Sep 1;25(18). doi:10.3390/ijms25189855 PubMed PMID: 39337342.
 40. Singh H, Goyal A, Bhardwaj SK, Khatri M, Bhardwaj N. Highly robust UiO-66@PVDF metal–organic framework beads for tartrazine removal from aqueous solutions. *Materials Science and Engineering: B*. 2023 Feb 1;288. doi:10.1016/j.mseb.2022.116165
 41. Tran HN, You SJ, Chao HP. Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: A comparison study. *J Environ Chem Eng*. 2016 Sep 1;4(3):2671–82. doi:10.1016/j.jece.2016.05.009
 42. Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*. 2010. p. 2–10. doi:10.1016/j.cej.2009.09.013
 43. Wang S, Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2010. p. 11–24. doi:10.1016/j.cej.2009.10.029
 44. Huang H, Huang B, Huang Y, Yang J, Ye Y, Chen Y. Removal of orange G via environmentally friendly GO@Fe₃O₄-COOH@NH₂-MIL-101(Fe) nanocomposite. *Desalination Water Treat*. 2021 Jul 1;228:431–43. doi:10.5004/dwt.2021.27337
 45. Shi Z, Xu C, Guan H, Li L, Fan L, Wang Y, et al. Magnetic metal organic frameworks (MOFs) composite for removal of lead and malachite green in wastewater. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2018 Feb 20;539:382–90. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.12.043
 46. Bao S, Li K, Ning P, Peng J, Jin X, Tang L. Synthesis of amino-functionalization magnetic multi-metal organic framework (Fe₃O₄/MIL-101(Al_{0.9}Fe_{0.1})/NH₂) for efficient removal of methyl orange from aqueous solution. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2018 Jun 1;87:64–72. doi:10.1016/j.jtice.2018.03.009
 47. Alqadami AA, Naushad M, Alothman ZA, Ahamad T. Adsorptive performance of MOF nanocomposite for methylene blue and malachite green dyes: Kinetics, isotherm and mechanism. *J Environ Manage*. 2018 Oct 1;223:29–36. doi:10.1016/j.jenvman.2018.05.090 PubMed PMID: 29885562.
 48. Aslam S, Zeng J, Subhan F, Li M, Lyu F, Li Y, et al. In situ one-step synthesis of Fe₃O₄@MIL-100(Fe) core-shells for adsorption of methylene blue from water. *J Colloid Interface Sci*. 2017 Nov 1;505:186–95. doi:10.1016/j.jcis.2017.05.090 PubMed PMID: 28578281.

ANEXOS:

Anexo I:

Fotos del trabajo experimental realizado



Sistema de coprecipitación para la síntesis de Fe_3O_4



Soluciones precursoras empleadas en la síntesis del MOF: a la derecha, solución 1 (ácido aminotereftálico en DMF, de aspecto claro); a la izquierda, solución 2 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con magnetita, de color oscuro/negro).



Soluciones precursoras sonicadas individualmente (solución 1: ácido aminotereftálico en DMF y solución 2: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con magnetita), posteriormente mezcladas y sometidas a ultrasonificación conjunta, durante 30min.

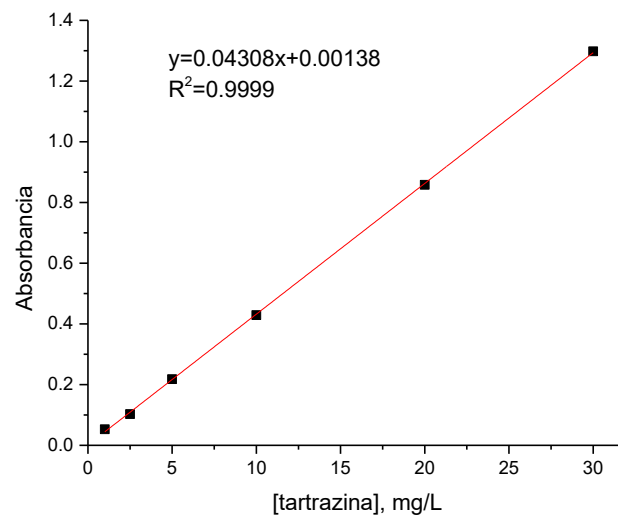


Mezcla de reactivos transferida al autoclave de teflón y colocada en la estufa para el tratamiento solvothermal ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 h) durante el proceso de síntesis del MOF.

Anexo II:

Datos de la curva de calibración

[tartrazina], mg/L	Absorbancia
1	0.053
2.5	0.103
5	0.218
10	0.429
20	0.858
30	1.298



Preparación de la curva de calibración de tartrazina para el análisis de adsorción del MOF magnético.

Anexo III:**Datos de la Isoterma de Langmuir**

Considerando la ecuación de la recta:

$$y = 0.0431x + 0.0014$$

Masa Exp. (g)	Cc. Teórica (ppm)	Abs 01	Abs 02	Abs 03	Cc. Exp. 01 (ppm)	Cc. Exp. 02 (ppm)	Cc. Exp. 03 (ppm)
0,0201	10	0,420	0,429	0,423	9,712296984	9,92111369	9,781902552
0,0204	15	0,640	0,654	0,642	14,81670534	15,1415313	14,86310905
0,0201	20	0,846	0,854	0,864	19,5962877	19,7819026	20,01392111
0,0202	25	1,073	1,079	1,088	24,86310905	25,0023202	25,21113689
0,0203	30	1,3	1,276	1,282	30,12993039	29,5730858	29,71229698

abs Ce1	abs Ce2	abs Ce3	C_e 1 (ppm)	C_e 2 (ppm)	C_e 3 (ppm)	q_e 1 (mg/g)	q_e 2 (mg/g)	q_e 3 (mg/g)
0,22 1	0,16 9	0,17 1	5,0951276 1	3,8886310 9	3,9350348	11,48549 6	15,006175 6	14,544447 1
0,36 3	0,28 8	0,29 0	8,3897911 8	6,6496519 7	6,6960556 8	15,75224 1	20,813429 8	20,017287 7
0,46 8	0,38 1	0,49 7	10,825986 1	8,8074245 9	11,498839 9	21,81667 1	27,299696 4	21,181794
0,58 5	0,54 2	0,64 0	13,540603 2	12,542923 4	14,816705 3	28,02600 4	30,840091	25,728791
0,89 2	0,78 8	0,78 7	20,663573 1	18,25058	18,227378 2	23,31615 1	27,887945 3	28,287977 3

REPLICA 01		REPLICA 02		REPLICA 03	
C _e 1 (ppm)	C _e /q _e 1 (g/L)	C _e 2 (ppm)	C _e /q _e 2 (g/L)	C _e 3 (ppm)	C _e /q _e 3 (g/L)
5,09512761	0,44361407	3,88863109	0,25913538	3,9350348	0,27055238
8,38979118	0,53260939	6,64965197	0,31948852	6,69605568	0,33451364
10,8259861	0,4962254	8,80742459	0,32261987	11,4988399	0,54286431
13,5406032	0,48314426	12,5429234	0,40670838	14,8167053	0,57588036
20,6635731	0,88623431	18,25058	0,65442541	18,2273782	0,64435071

PROMEDIO	
C _e (ppm)	C _e /q _e (g/L)
4,3062645	0,32443395
7,24516628	0,39553718
10,3774169	0,45390319
13,6334107	0,48857767
19,0471771	0,72833681

Anexo IV:

Datos de la Isoterma de Freundlich

Considerando la ecuación de la recta:

$$y = 0.0431x + 0.0014$$

Masa experimental	Cc. teórica	Abs 01	Abs 02	Abs 03	Cc. Exp. 01	Cc. Exp. 02	Cc. Exp. 03
0,0201	10	0,420	0,429	0,423	9,712296984	9,92111369	9,781902552
0,0204	15	0,64	0,654	0,642	14,81670534	15,1415313	14,86310905
0,0201	20	0,846	0,854	0,864	19,5962877	19,7819026	20,01392111
0,0202	25	1,073	1,079	1,088	24,86310905	25,0023202	25,21113689
0,0203	30	1,300	1,276	1,282	30,12993039	29,5730858	29,71229698

abs Ce1	abs Ce2	abs Ce3	C_e 1 (ppm)	C_e 2 (ppm)	C_e 3 (ppm)	q_e 1 (mg/g)	q_e 2 (mg/g)	q_e 3 (mg/g)
0,22 1	0,16 9	0,17 1	5,0951276 1	3,8886310 9	 3,9350348	11,48549 6	15,006175 6	14,544447 1
0,36 3	0,28 8	0,29 0	8,3897911 8	6,6496519 7	6,6960556 8	15,75224 1	20,813429 8	20,017287 7
0,46 8	0,38 1	0,49 7	10,825986 1	8,8074245 9	11,498839 9	21,81667 1	27,299696 4	 21,181794
0,58 5	0,54 2	0,64 0	13,540603 2	12,542923 4	14,816705 3	28,02600 4	 30,840091	 25,728791
0,89 2	0,78 8	0,78 7	20,663573 1	 18,25058	18,227378 2	23,31615 1	27,887945 3	28,287977 3

REPLICA 01		REPLICA 02		REPLICA 03	
Log(C_e 1)	Log(Q_e 1)	Log(C_e 2)	Log(Q_e 2)	Log(C_e 3)	Log(Q_e 3)
0,70715507	1,06014975	0,58979674	1,17627002	0,59494858	1,16269722
0,92375115	1,19734234	0,82279892	1,31834365	0,82581906	1,30140523
1,03446746	1,33878848	0,94484893	1,43615782	1,06065403	1,32596274
1,13163801	1,44756119	1,09839877	1,48911565	1,17075164	1,41041938
1,31520542	1,36765686	1,26127667	1,44541652	1,2607242	1,4516019

PROMEDIO	
Log(C_e)	Log(Q_e)
0,63063346	1,133039
0,85745637	1,27236374
1,01332348	1,36696968
1,13359614	1,44903207
1,27906877	1,42155842

Anexo V:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm

Tiempo	masa experimental	Concentración	Abs real	Cc real	Abs real2	Cc real 2	Abs real3	abs C 3
0	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.423
15	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.271
30	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.209
45	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.187
60	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.181
75	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.174
90	0.0201	10	0.42	9.712296984	0.429	9.92111369	0.423	0.171

abs C 1	abs C 2	abs C 3	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C 3 (ppm)	qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0.42	0.429	0.423	9.71229698	9.92111369	9.78190255	0	0	0
0.292	0.279	0.271	6.7424594	6.44083527	6.25522042	7.38765569	8.65740901	8.77284113
0.244	0.216	0.209	5.6287703	4.97911833	4.81670534	10.1580266	12.2935208	12.3512369
0.233	0.184	0.187	5.37354988	4.23665893	4.3062645	10.7929032	14.1404347	13.6209902
0.228	0.178	0.181	5.2575406	4.0974478	4.16705336	11.0814835	14.4867311	13.9672865
0.224	0.17	0.174	5.16473318	3.91183295	4.00464037	11.3123478	14.9484596	14.371299
0.221	0.169	0.171	5.09512761	3.88863109	3.9350348	11.485496	15.0061756	14.5444471

Tiempo	y1	y2	y3
0	2.44108502	2.70846182	2.67720928
15	1.41046007	1.84826056	1.75295038
30	0.28327441	0.99792779	0.78536635
45	-0.36731316	-0.14416961	-0.07963108
60	-0.90630966	-0.65499523	-0.54963471
75	-1.75360752	-2.85221981	-1.75360752

PROMEDIO	
Tiempo	y4
0	2.6089187
15	1.670557
30	0.6888562
45	-0.1970379
60	-0.7036465
75	-2.1198116

Anexo VI:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm

Tiempo	masa experimental	Concentración	Abs real	Cc real	Abs real2	Cc real 2	Abs real3	Cc real 3
0	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
15	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
30	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
45	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
60	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
75	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905
90	0.0204	15	0.64	14.81670534	0.654	15.1415313	0.642	14.86310905

abs C 1	abs C 2	abs C 3	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C 3 (ppm)	qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0.64	0.654	0.642	14.8167053	15.1415313	14.863109	0	0	0
0.454	0.472	0.449	10.5011601	10.9187935	10.3851508	10.5773168	10.3498476	10.9753878
0.395	0.384	0.372	9.13225058	8.87703016	8.59860789	13.9324871	15.3541695	15.3541695
0.388	0.342	0.325	8.96983759	7.9025522	7.50812065	14.3305582	17.7425959	18.0269324
0.378	0.308	0.318	8.73781903	7.1136891	7.34570766	14.8992312	19.6760839	18.4250034
0.372	0.297	0.3	8.59860789	6.85846868	6.92807425	15.2404349	20.3016241	19.4486147
0.363	0.288	0.29	8.38979118	6.64965197	6.69605568	15.7522406	20.8134298	20.0172877

Tiempo	y1	y2	y3
0	2.75698261	3.03559844	2.99659628
15	1.64382461	2.34790087	2.20186931
30	0.59870101	1.6973133	1.53968435
45	0.35184093	1.12194915	0.68831317
60	-0.15898469	0.12869738	0.46516962
75	-0.66981032	-0.66981032	-0.5644498

PROMEDIO	
Tiempo	Y4
0	2.92972578
15	2.0645316
30	1.27856622
45	0.72070109
60	0.14496077
75	-0.63469014

Anexo VII:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm

Tiempo	masa experimental	Concentración	Abs real	Cc real	Abs real2	Cc real 2	Abs real3	Cc real 3
0	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
15	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
30	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
45	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
60	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
75	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111
90	0.0201	20	0.846	19.5962877	0.854	19.7819026	0.864	20.01392111

abs C 1	Abs C 2	abs C 3	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C 3 (ppm)	qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0.846	0.854	0.864	19.5962877	19.7819026	20.0139211	0	0	0
0.667	0.651	0.634	15.4431555	15.0719258	14.6774942	10.3311748	11.7163602	13.2746938
0.532	0.525	0.551	12.3109049	12.1484919	12.7517401	18.1228429	18.9885838	18.0651268
0.492	0.464	0.513	11.3828306	10.7331787	11.8700696	20.4314853	22.5092634	20.2583371
0.478	0.412	0.509	11.0580046	9.52668213	11.7772622	21.2395101	25.5104986	20.4892013
0.472	0.394	0.504	10.9187935	9.10904872	11.6612529	21.5858065	26.5493876	20.7777816
0.468	0.381	0.497	10.8259861	8.80742459	11.4988399	21.8166707	27.2996964	21.181794

Tiempo	y1	y2	y3
0	3.08267439	3.30687558	3.05314204
15	2.44108502	2.74620215	2.06776112
30	1.30666328	2.11759349	1.13676424
45	0.32583402	1.5666208	-0.07963108
60	-0.54963471	0.5817674	-0.36731316
75	-1.46592545	-0.28727045	-0.90630966

PROMEDIO	
Tiempo	y4
0	3.147564
15	2.41834943
30	1.52034034
45	0.60427458
60	-0.11172682
75	-0.88650185

Anexo VIII:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm

Tiempo	masa experimental	Concentración	Abs real	Cc real	Abs real2	Cc real 2	Abs real3	Cc real 3
0	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
15	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
30	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
45	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
60	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
75	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689
90	0.0202	25	1.073	24.86310905	1.079	25.0023202	1.088	25.21113689

abs C 1	abs C 2	abs C 3	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C 3 (ppm)	qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
1.073	1.079	1.088	24.863109	25.0023202	25.2111369	0	0	0
0.83	0.865	0.867	19.225058	20.037123	20.0835267	13.9555719	12.2900921	12.6921045
0.733	0.697	0.719	16.974478	16.1392111	16.649652	19.5263146	21.9383887	21.1917944
0.672	0.615	0.692	15.5591647	14.2366589	16.0232019	23.0295651	26.6476764	22.7424135
0.621	0.585	0.67	14.3758701	13.5406032	15.512761	25.9585123	28.3705865	24.0058809
0.602	0.557	0.645	13.9350348	12.8909513	14.9327146	27.0496887	29.9786359	25.4416393
0.585	0.542	0.64	13.5406032	12.5429234	14.8167053	28.0260045	30.840091	25.728791

Tiempo	y1	y2	y3
0	3.33313281	3.4288155	3.24761064
15	2.64407561	2.92046973	2.56776742
30	2.14002968	2.18624252	1.51226526
45	1.60872552	1.43327685	1.09406112
60	0.72633634	0.90401752	0.54401479
75	-0.02396925	-0.14913239	-1.24774468

PROMEDIO	
Tiempo	y4
0	3.33651965
15	2.71077092
30	1.94617915
45	1.37868783
60	0.72478955
75	-0.47361544

Anexo IX:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-primer orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm

abs C 1	abs C 2	abs C 3	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C 3 (ppm)	qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
1.3	1.276	1.282	30.1299304	29.5730858	29.712297	0	0	0
1.051	1.047	1.054	24.3526682	24.2598608	24.4222738	14.2297098	13.0867612	13.0296138
0.982	0.885	0.912	22.7517401	20.5011601	21.1276102	18.1728824	22.3446447	21.1445487
0.954	0.842	0.865	22.1020882	19.5034803	20.037123	19.7730104	24.8019842	23.8304779
0.925	0.81	0.828	21.4292343	18.7610209	19.1786543	21.4302859	26.6307019	25.9449327
0.898	0.795	0.798	20.8027842	18.412993	18.4825986	22.9732664	27.4879133	27.6593556
0.892	0.788	0.787	20.6635731	18.25058	18.2273782	23.316151	27.8879453	28.2879773

Tiempo	masa experimental	Concentración	Abs real	Cc real	Abs real2	Cc real 2	Abs real3	Cc real 3
0	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
15	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
30	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
45	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
60	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
75	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698
90	0.0203	30	1.3	30.12993039	1.276	29.5730858	1.282	29.71229698

Tiempo	y1	y2	y3
0	3.1491463	3.32819453	3.34243688
15	2.20678332	2.69470718	2.72512778
30	1.63768879	1.7125901	1.96619286
45	1.26501351	1.12686317	1.49458795
60	0.63438668	0.22892158	0.85145119
75	-1.07036141	-0.91621073	-0.4642256

PROMEDIO	
Tiempo	y4
0	3.27325924
15	2.5422061
30	1.77215725
45	1.29548821
60	0.57158648
75	-0.81693258

Anexo X:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 10 ppm

qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0	0	0
7.38765569	8.65740901	8.77284113
10.1580266	12.2935208	12.3512369
10.7929032	14.1404347	13.6209902
11.0814835	14.4867311	13.9672865
11.3123478	14.9484596	14.371299
11.485496	15.0061756	14.5444471

Tiempo	y1	y2	y3	Promedio
0	-	-	-	-
15	2.03041406	1.73262	1.70982237	1.82428548
30	2.95332955	2.44030986	2.42890654	2.60751532
45	4.16940642	3.18236327	3.30372458	3.55183142
60	5.4144375	4.14172112	4.29575207	4.61730356
75	6.62992347	5.01723938	5.21873494	5.62196593
90	7.83596985	5.99753077	6.18792857	6.67380973

Anexo XI:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 15 ppm

qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0	0	0
10.5773168	10.3498476	10.9753878
13.9324871	15.3541695	15.3541695
14.3305582	17.7425959	18.0269324
14.8992312	19.6760839	18.4250034
15.2404349	20.3016241	19.4486147
15.7522406	20.8134298	20.0172877

Tiempo	y1	y2	y3	Promedio
0	-	-	-	-
15	1.41812903	1.4492967	1.3666943	1.41137335
30	2.15324082	1.95386667	1.95386667	2.02032472
45	3.14014286	2.53626923	2.49626498	2.72422569
60	4.02705344	3.04938728	3.25644444	3.44429505
75	4.9211194	3.69428571	3.85631579	4.1572403
90	5.71347292	4.32413115	4.49611364	4.84457257

Anexo XII:

Datos de la cinética adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 20 ppm

qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0	0	0
10.3311748	11.7163602	13.2746938
18.1228429	18.9885838	18.0651268
20.4314853	22.5092634	20.2583371
21.2395101	25.5104986	20.4892013
21.5858065	26.5493876	20.7777816
21.8166707	27.2996964	21.181794

Tiempo	y1	y2	y3	Promedio
0	-	-	-	-
15	1.4519162	1.28026108	1.12996957	1.28738228
30	1.65536943	1.57989666	1.66065815	1.63197474
45	2.20248305	1.99917692	2.22130769	2.14098922
60	2.82492391	2.35197285	2.92837183	2.7017562
75	3.47450535	2.82492391	3.609625	3.30301809

Anexo XIII:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 25 ppm

qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0	0	0
13.9555719	12.2900921	12.6921045
19.5263146	21.9383887	21.1917944
23.0295651	26.6476764	22.7424135
25.9585123	28.3705865	24.0058809
27.0496887	29.9786359	25.4416393
28.0260045	30.840091	25.728791

Tiempo	y1	y2	y3	Promedio
0	-	-	-	-
15	1.07483951	1.22049533	1.1818371	1.15905731
30	1.53638824	1.36746597	1.41564228	1.43983216
45	1.95400998	1.68870259	1.97868182	1.87379813
60	2.31138053	2.1148664	2.49938756	2.30854483
75	2.77267516	2.50178161	2.94792325	2.74079334

Anexo XIV:

Datos de la cinética de adsorción de pseudo-segundo orden para una concentración de tartrazina de 30 ppm

qt 1 (mg/g)	qt 2 (mg/g)	qt 3 (mg/g)
0	0	0
14.2297098	13.0867612	13.0296138
18.1728824	22.3446447	21.1445487
19.7730104	24.8019842	23.8304779
21.4302859	26.6307019	25.9449327
22.9732664	27.4879133	27.6593556
23.316151	27.8879453	28.2879773

Tiempo	y1	y2	y3	Promedio
0	-	-	-	-
15	1.05413253	1.14619651	1.15122368	1.11718424
30	1.65081132	1.34260358	1.41880541	1.4707401
45	2.27582948	1.81437097	1.88833813	1.99284619
60	2.799776	2.25303863	2.31259031	2.45513498
75	3.26466418	2.72847193	2.71155992	2.90156534

Anexo XV:

Datos de la isoterma BET para el NH₂-MIL-101(Fe)

Saturation Pressure (mmHg) : 760

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0,05207037	39,5734787	16,30143503
0,07993942	60,75395966	17,59177513
0,10755827	81,74428558	18,62496472
0,13542565	102,9234924	19,5738104
0,16328616	124,0974808	20,42785622
0,19088858	145,0753174	21,22241627
0,21849552	166,0565948	22,03745788
0,24634379	187,221283	22,80475049
0,27414834	208,3527374	23,51872707
0,30192723	229,4646912	24,21533124
0,33807987	256,9407043	25,09230476
0,37400641	284,244873	26,05867687
0,40995728	311,5675354	27,02379997
0,44600934	338,9671021	27,96526036
0,482257	366,5153198	28,97648999
0,51835066	393,9465027	30,023392
0,5544061	421,3486328	31,10470732
0,59025269	448,592041	32,37434987
0,62608353	475,8234863	33,69881531
0,66199485	503,1160889	35,1587842
0,69796817	530,4558105	36,81404202
0,73409143	557,9094849	38,90490264

0,76999624	585,1971436	41,55118479
0,80574493	612,3661499	45,03761784
0,84202913	639,9421387	50,36022891
0,87802758	667,3009644	58,50175793
0,91388445	694,5521851	72,81118564
0,94984621	721,8831177	102,7368629
0,98606503	749,4094238	181,1491372
0,91051684	691,9927979	87,96261268
0,83283876	632,9574585	56,4380844
0,75670519	575,0959473	44,04410218
0,68055621	517,2227173	37,55814909
0,60465453	459,5374451	33,40066484
0,5281831	401,4191589	30,50110648
0,45231853	343,762085	28,08884791
0,37622902	285,9340515	26,01382605
0,29995902	227,9688568	24,09876063

Anexo XVI:

Datos de las isoterma BET para el $Fe_3O_4@NH_2-MIL-101(Fe)$

Saturation Pressure (mmHg) : 760

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0,05194048	39,4747658	10,98622098
0,07976312	60,6199684	12,12328389
0,10750849	81,7064514	13,04177159
0,13533783	102,85675	13,85840348
0,16317103	124,009979	14,62412732
0,19080646	145,012909	15,35105138
0,21843083	166,007431	16,00561114
0,24627593	187,169708	16,67221103
0,27411499	208,327393	17,36144792
0,30185752	229,411713	18,0118311
0,33805422	256,921204	18,87263571
0,37390333	284,166534	19,73816185

0,40987866	311,507782	20,68199288
0,44597867	338,943787	21,58831982
0,48223471	366,498383	22,56960812
0,51834042	393,938721	23,65322624
0,55439184	421,337799	24,79057369
0,59020309	448,554352	26,04746251
0,62604181	475,791779	27,41700695
0,6619129	503,053802	28,99083353
0,69789694	530,401672	30,76515311
0,73407183	557,894592	32,88914476
0,76992766	585,14502	35,40348723
0,80573192	612,356262	38,52488881
0,84195645	639,886902	42,7171077
0,87800847	667,286438	48,5596373
0,91387072	694,541748	56,81001005
0,94982035	721,863464	70,10426975
0,98604728	749,395935	103,8248993
0,91046994	691,957153	60,12036687
0,83275861	632,896545	43,94303333
0,75673386	575,117737	35,09449959
0,68048979	517,172241	29,94847014
0,60452082	459,435822	26,43295981
0,52813235	401,380585	23,91869965
0,45230095	343,748718	21,70237331
0,37610433	285,839294	19,7770255
0,29987942	227,908356	18,11239407