



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE COLORANTES
CATIÓNICOS EN PELÍCULAS A BASE DE QUITOSANO”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:
JESSICA ZUBIETA AGUIRRE
No. DE CONTROL: M23281650**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ROSA ELVIRA ZAVALA ARCE**

**CODIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2025.



Metepec, Edo. de México, 26/Noviembre/2025
DEPI-3200-652/2025

JESSICA ZUBIETA AGUIRRE
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE COLORANTES CATIONÍNICOS EN PELÍCULAS A BASE DE QUITOSANO**", la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Educación, integridad y ciencia"



ccp. Archivo
JSj/mccl



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México.
C.P. 52149, Tel. Dirección: 7222087205, Commut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Metepet, Edo. de México, 25/Noviembre/2025
DEPI-3200-651/2025

**DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la Tesis: "**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE COLORANTES CATIÓNICOS EN PELÍCULAS A BASE DE QUITOSANO**", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de **MAESTRA** en **CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL** presenta el **C. JESSICA ZUBIETA AGUIRRE** con número de control **M23281650** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DRA. ROSA ELVIRA ZAVALA GARCÍA
DIRECTORA DE TESIS

DR. JOSE LUIS GARCIA RIVAS
CODIRECTOR DE TESIS

DRA. BEATRIZ GARCIA GAITAN
REVISORA DE TESIS

DR. ALFREDO GARCIA GONZALEZ
REVISOR DE TESIS

ccp, Archivo
350/mcc1



Av. Tecnológico 5/11, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52148, Tel. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: infotoluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



Agradecimientos

Agradezco profundamente al Instituto Tecnológico de Toluca por brindarme la oportunidad de desarrollar experimentalmente este proyecto y por ser el espacio donde fortalecí mi formación profesional y personal.

Expreso mi sincera gratitud a la Dra. Rosa Elvira Zavala Arce y el Dr. Alfredo García González, por su confianza, por impulsarme a crecer y por todas las enseñanzas, conocimientos y orientación que me brindaron a lo largo de este camino. Gracias por su acompañamiento constante y por creer en mi capacidad para concluir este trabajo.

A el Dr. José Luis García Rivas y la Dra. Beatriz García Gaitán, agradezco su valiosa cooperación en la revisión de esta tesis y su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

“Las personas que inspiran no solo iluminan el camino, también enseñan a caminar.”

A mis amigos y compañeros que permanecieron a mi lado durante esta etapa: Gaby, Kim, Adri, Bett, Ale, Dany, Alfonso y Lily, gracias por compartir su tiempo, conocimientos, entusiasmo y ánimos. Gracias por ser apoyo, guía, alegría y equipo. Agradezco también a Jetz e Ian, por su invaluable apoyo en el laboratorio, especialmente en los momentos de mayor carga de trabajo; esas manos extras que siempre aparecían justo cuando más se necesitaban.

“El compañerismo convierte los retos en aprendizajes y los esfuerzos en logros compartidos.”

“Arrancar un proyecto es difícil, pero trabajar acompañada de amigos lo hace posible.”

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a las instituciones que hicieron posible este proceso: a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes CONACYT) por la Beca Nacional (tradicional) 2023-2, No. CVU: 1298663; al cuerpo académico Estudios y aplicaciones ambientales de materiales por el apoyo en el financiamiento, así como al Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Toluca, y especialmente a la Mtra. Vero, por compartir sus conocimientos y brindar apoyo durante el uso de las instalaciones. En general, agradezco al ITToluca por su compromiso con la educación y la investigación en México.

Gracias a todos por formar parte de este camino y por contribuir a que este proyecto se hiciera realidad.

Dedicatorias

Antes que nada, agradezco a Dios por la fortuna que tengo, por acompañarme siempre en este camino llamado vida, por guiarme y rodearme de ángeles que llenan este viaje de buenos momentos, alegría y emociones. Gracias por hacer más llevaderos los días difíciles y recordarme que todo estará bien. Sin Ti, nada es posible, y me has permitido conocer Tu infinita misericordia. Como siempre lo decimos: no es suerte, estamos bendecidos.

A mis padres, mi papá y mi mamá, pilares de nuestra familia, agradezco profundamente sus valores, educación, cuidados y apoyo incondicional. Sin ustedes no sería quien soy hoy. Su ejemplo ha sido siempre mi inspiración y mi motor para superarme. Mi meta ha sido honrarlos y devolverles un poco de todo lo que me han dado. Agradezco a Dios por sus vidas y porque me permitió tenerlos como mis padres.

A mi abuelita Juana, porque sé que desde donde estás sigues cuidándome. Eres ese ángel que nunca me deja desamparada, cuyas oraciones siguen siendo las más efectivas. Gracias por creer siempre en mí. Me hubiera encantado compartir este momento contigo y con mi abuelo, pero Dios los necesitaba más en el cielo. Este logro es uno más que envío hasta allá arriba, con la esperanza de que sigas orgullosa de mí.

A Josi, por ser mi pareja y mi confidente, por caminar conmigo en este proceso lleno de esfuerzo, por tu paciencia ante mis descuidos y por motivarme a ser mejor persona y profesional. Gracias por ser mi pilar en todos los sentidos y por darme un hogar lleno de amor, donde puedo ser yo misma y sentirme cuidada, plena e impulsada. Sin ti, este logro no habría sido posible. Gracias por tu apoyo en esta etapa de mi vida. Te amo.

A mis hermanos,

a Leo, por ser ese sostén y mi lugar seguro, por hacerme sentir que a tu lado nunca estaré sola y que siempre tendré tu amor incondicional. Gracias por confiar en mí, por alegrarte con mis triunfos y acompañarme en mis tristezas.

A Car, Lily, Mane y Lupita, gracias por ser mis compañeros de aventuras, por brindarme su apoyo cuando lo necesito, por ser quienes son y formar parte de mi vida. A cada uno de ustedes, gracias por hacer mis días más felices y llevaderos, y por recordarme que siempre cuento con ustedes.

RESUMEN

El impacto ambiental causado por los colorantes en aguas residuales representa un problema creciente debido a su toxicidad y alta estabilidad química, lo que dificulta su eliminación mediante métodos convencionales. En este trabajo se evaluó la capacidad de adsorción de películas de quitosano entrecruzadas con etilenglicol diglicidil éter (EGDE) para la remoción de los colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57), ambos pertenecientes a la familia de los colorantes azoicos.

Las películas fueron caracterizadas mediante FTIR, TGA, DSC, pH_{pzc}, determinación de humedad y análisis de pKa, con el fin de comprender la influencia de los grupos funcionales activos del quitosano sobre la eficiencia del proceso. Se realizaron estudios de isotermas y cinéticas de adsorción bajo diferentes condiciones de pH y concentración inicial de colorante para conocer las capacidades como adsorbente de las películas y tener una estimación del tipo de mecanismo de adsorción que se presenta.

Los resultados mostraron que el Amarillo 5 presentó mayor afinidad por el adsorbente en medio ácido (pH 2.5), alcanzando una capacidad máxima (q_m) de 824.89 mg/g, atribuida a interacciones electrostáticas entre los grupos $-SO_3^-$ del colorante y los $-NH_3^+$ del quitosano. En cambio, el Amarillo 57 mostró mejor adsorción en condiciones alcalinas (pH 12.5), con un q_m de 274.30 mg/g, resultado de interacciones secundarias como puentes de hidrógeno y fuerzas de dispersión. En ambos casos, el modelo de Langmuir describió adecuadamente la adsorción, indicando un proceso en monocapa.

Estos resultados confirman el potencial de las películas de quitosano entrecruzado con EGDE como un material biodegradable, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes azoicos, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias y de bajo costo en el ámbito ambiental.

ABSTRACT

The environmental impact caused by dyes in wastewater represents a growing problem due to their toxicity and high chemical stability, which hinders their removal by conventional methods. In this study, the adsorption capacity of chitosan films crosslinked with ethylene glycol diglycidyl ether (EGDE) was evaluated for the removal of the dyes Yellow 5 (Y5) and Yellow 57 (Y57), both belonging to the azo dye family.

The films were characterized by FTIR, TGA, DSC, pH_{zc}, moisture determination, and pKa analysis in order to understand the influence of the active functional groups of chitosan on the efficiency of the process. Adsorption isotherm and kinetic studies were carried out under different pH conditions and initial dye concentrations to determine the adsorption capacities of the films and to estimate the type of adsorption mechanism involved.

The results showed that Yellow 5 exhibited greater affinity for the adsorbent in an acidic medium (pH 2.5), reaching a maximum adsorption capacity (q_m) of 824.89 mg/g, attributed to electrostatic interactions between the $-SO_3^-$ groups of the dye and the $-NH_3^+$ groups of chitosan. In contrast, Yellow 57 showed better adsorption under alkaline conditions (pH 12.5), with a q_m of 274.30 mg/g, as a result of secondary interactions such as hydrogen bonding and dispersion forces. In both cases, the Langmuir model adequately described the adsorption process, indicating monolayer adsorption.

These results confirm the potential of EGDE-crosslinked chitosan films as a biodegradable, efficient, and sustainable material for the treatment of wastewater contaminated with azo dyes, contributing to the development of clean and low-cost environmental technologies.

CONTENIDO

RESUMEN	VII
ABSTRACT	i
CONTENIDO.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
2 INTRODUCCIÓN	1
3 FUNDAMENTOS	4
3.1 Antecedentes	4
3.2 Contaminación del agua por colorantes	10
3.2.1 Efectos adversos sobre la fauna, flora y los seres humanos	11
3.2.2 Métodos de remoción de colorantes	11
3.2.3 Colorantes concepto y clasificación.....	13
3.2.4 Amarillo 57.....	14
3.2.5 Amarillo 5.....	15
3.2.6 Cuantificación de los colorantes	16
3.3 Sorción	16
3.3.1 Adsorción.....	17
3.4 Modelos de dinámica molecular	22
3.4.1 Modelos de transferencia de masa.....	22
3.4.2 Modelo de Crank	22
3.4.3 Correlación de Wilke-Chang.....	23
3.5 Adsorbentes más comunes.....	24
3.5.1 Propiedades del quitosano	26

3.5.2	Estructura química.....	27
3.5.3	Agentes entrecruzantes	27
3.5.4	Etilenglicol diglicidil éter (EDGE)	28
3.6	Técnicas de caracterización	28
3.6.1	Análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR).....	29
3.6.2	Porcentaje de humedad.....	29
3.6.3	Análisis superficial por fisisorción de N ₂	30
3.6.4	Análisis termogravimétrico.....	30
3.6.5	Calorimetría diferencial de barrido.....	31
3.6.6	Determinación del pKa	31
4	MÉTODO	33
4.1	Síntesis de las películas a base de quitosano.....	34
4.2	Caracterización de las películas.....	35
4.2.1	Determinación del porcentaje de humedad	35
4.2.2	Punto de carga cero (PCC)	35
4.2.3	Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	36
4.2.4	Análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR).....	37
4.2.5	Análisis termogravimétrico (TGA)	37
4.2.6	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	37
4.3	Pruebas preliminares de adsorción	38
4.3.1	Metodología para cuantificación de los colorantes	38
4.3.2	Cálculo de la difusividad de los colorantes	40
4.3.3	Efecto de la agitación en la adsorción de colorantes.....	40
4.3.4	Determinación del pKa de colorantes	41
4.3.5	Efecto de pH sobre la capacidad de adsorción	42

4.4	Cinéticas de adsorción	43
4.4.1	Sistema un solo componente	43
4.5	Isotermas de adsorción	44
4.5.1	Sistema un solo componente	44
4.5.2	Sistema binario	45
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
5.1	Síntesis de películas a base de quitosano	47
5.2	Caracterización de las películas.....	47
5.2.1	Determinación de porcentaje de humedad	47
5.2.2	Punto de carga cero (PCC)	48
5.2.3	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	52
5.2.4	Ánálisis por espectroscopía infrarroja (FTIR).....	55
5.2.5	Análisis termogravimétrico (TGA)	60
5.2.6	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	62
5.3	Pruebas preliminares de adsorción	64
5.3.1	Metodología para cuantificación del colorante.....	64
5.3.2	Cálculo de la difusividad de colorante	68
5.3.3	Efecto de la agitación en la adsorción de colorantes.....	70
5.3.4	Determinación del pKa de colorantes	71
5.3.5	Efecto de pH sobre la capacidad de adsorción	79
5.4	Cinéticas de adsorción	82
5.4.1	Sistema un solo componente	82
5.5	Isotermas de adsorción	97
5.5.1	Sistema un solo componente	97
5.5.2	Sistema binario	102

6 CONCLUSIONES	109
7 FUENTES CONSULTADAS.....	111
ANEXOS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura del colorante amarillo 57.....	14
Figura 2.2 Estructura del colorante amarillo 5.....	15
Figura 2.3 Diferentes procesos de Sorción.	17
Figura 2.4 Términos básicos de adsorción.....	18
Figura 2.5 Estructura de la quitina, quitosano y proceso de desacetilación (Nilsen	25
Figura 2.6 Etilenglicol diglicidil éter (Ayala-Gutiérrez et al., 2023).....	28
Figura 3.1 Diagrama general del proceso de evaluación de la capacidad de adsorción de colorantes catiónicos en películas a base de quitosano.	33
Figura 4.1 Película a base de quitosano (Seca a la izquierda y humedad a la derecha).	47
Figura 4.2 Punto de carga cero para la película a base de Quitosano.....	49
Figura 4.3 Punto de carga cero para el colorante amarillo 57.....	50
Figura 4.4 Punto de carga cero para el colorante amarillo 5	51
Figura 4.5 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 57 (derecha) a 2500x.....	52
Figura 4.6 Micrografías que muestran la comparación de la película a base de quitosano (izquierda) con la película después del proceso de adsorción con colorante amarillo 57(derecha) a un aumento de 15000X.....	53
Figura 4.7 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 57 (derecha) a 35000x.....	53
Figura 4.8 Comparación de la película a base de quitosano (derecha) y tras adsorción de Amarillo 5 (izquierda) a 2500x.....	54
Figura 4.9 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 5 (derecha) a 15000x.....	54
Figura 4.10 Comparación de la película a base de quitosano (derecha) y tras adsorción de Amarillo 5 (izquierda) a 35000x.....	55
Figura 4.11 Espectro infrarrojo del EGDE.	56
Figura 4.12 Espectro infrarrojo del quitosano.....	57
Figura 4.13 Espectro infrarrojo de la película a base de quitosano.....	58

Figura 4.14 Espectros infrarrojo de EGDE, quitosano y película de quitosano.	59
Figura 4.15 Termograma TGA del quitosano.	60
Figura 4.16 Termograma TGA de película de quitosano.	61
Figura 4.17 Transiciones térmicas del quitosano obtenidas por DSC.	63
Figura 4.18 Transiciones térmicas de la película de quitosano entrecruzada obtenidas por DSC.	64
Figura 4.19 Barridos de UV-Vis a diferentes concentraciones de amarillo 57.	65
Figura 4.20 Curva de calibración del amarillo 57.	66
Figura 4.21 Barridos de UV-Vis a diferentes concentraciones de amarillo 5.	67
Figura 4.22 Curva de calibración del amarillo 5.	68
Figura 4.23 Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción del colorante rojo 2, amarillo 5 y azul 1.	71
Figura 4.24 Diagrama de especiación teórica del colorante amarillo 57.	72
Figura 4.25 Diferentes especies del amarillo 57 en el rango de pH.	73
Figura 4.26 Barridos del colorante amarillo 57 a diferentes pH's.	74
Figura 4.27 Diagrama de especiación experimental del colorante amarillo 57.	75
Figura 4.28 Diagrama de especiación teórica del colorante amarillo 5.	76
Figura 4.29 Diferentes especies del amarillo 5 en el rango de pH.	77
Figura 4.30 Barridos del colorante amarillo 5 a diferentes pH's.	78
Figura 4.31 Diagrama de especiación experimental del colorante amarillo 5.	79
Figura 4.32 Efecto de pH en la adsorción de amarillo 5 con película a base de quitosano.	80
Figura 4.33 Efecto de pH en la adsorción de amarillo 57 con película a base de quitosano.	80
Figura 4.34 Comparación del efecto de pH en la adsorción de Amarillo 5 y Amarillo 57 sobre película de quitosano.	82
Figura 4.35 Cinética de adsorción del colorante amarillo 57 a un pH de 12.5, con quitosano a temperaturas de 10,30 y 50 °C.	83
Figura 4.36 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM57 a pH 12.5.	85
Figura 4.37 Cinética de adsorción de AM57 a pH neutro, con quitosano a 10, 30 y 50 °C.	87

Figura 4.38 Ajuste a modelos cinéticos para AM57 a pH neutro a 10 °C, b) 30 °C, c) 50 °C.....	88
Figura 4.39 Cinética de adsorción del colorante Amarillo 5 a pH 2.5 con quitosano a 10, 30 y 50 °C.....	90
Figura 4.40 Ajuste a modelos cinéticos para AM5 a pH 2.5, a) 10 °C, b) 30 °C, c) 50 °C.....	92
Figura 4.41 Cinética de adsorción de AM5 a pH neutro con quitosano a 10, 30 y 50 °C.....	94
Figura 4.42 Ajuste a modelos cinéticos para AM5 a pH 7:a) 10 °C, b) 30 °C, c) 50 °C	96
Figura 4.43 Isotermas de adsorción de los colorantes AM5 y AM57 a pH óptimo y neutro.....	98
Figura 4.44 a) y b) Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 5 sobre las películas de quitosano.....	99
Figura 4.45 Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 57 sobre películas de quitosano: a) pH 12.5, b) pH 7.	101
Figura 4.46 Isoterma de adsorción de sistema bicomponente AM5/AM57.	103
Figura 4.47 Isoterma de adsorción de la película a base de quitosano para el colorante AM5.	104
Figura 4.48 Isoterma de adsorción de la película a base de quitosano para el colorante AM57.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de eliminación de colorantes (Zhou <i>et al.</i> , 2019).....	12
Tabla 2.2 Modelos de adsorción cinéticos.	20
Tabla 4.1 Porcentaje de humedad de películas a base de quitosano.	48
Tabla 4.2 Difusividades de colorante amarillo 5 y 57 a diferentes temperaturas. .	69
Tabla 4.3 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM57 a pH 12.5 a 10, 30 y 50 °C	84

Tabla 4.4 Datos cinéticos de la adsorción del colorante amarillo 57 a un pH neutro.	87
.....
Tabla 4.5 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM5 a pH 2.5.	91
Tabla 4.6 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM5 a pH 7.	94
Tabla 4.7 Parámetros de ajuste a modelos de isotermas para películas de quitosano.	98
.....
Tabla 4.8 Resumen de datos obtenidos de isotermas de adsorción de la película a base de quitosano para los colorantes AM5 y AM57.	108

1 INTRODUCCIÓN

Los colorantes sintéticos, ampliamente utilizados en industrias como la textil, papelera, cosmética y farmacéutica (Tkaczyk, 2020; Cortazar, 2014), generan un impacto ambiental significativo al ser vertidos en cuerpos de agua residuales (Santos, 2020). En la industria textil, entre el 15 % y el 50 % del colorante empleado no se fija a los tejidos y termina en los desechos líquidos, contribuyendo a la contaminación de los ecosistemas acuáticos (Guzmán, 2018).

Los colorantes afectan el medio ambiente y la salud pública (Gwenzi, 2017) al reducir el oxígeno disuelto y generar condiciones anóxicas, perjudicando la vida acuática. Además, su presencia en el agua bloquea la luz solar y limita la difusión de oxígeno, impactando negativamente los ecosistemas acuáticos (Gallego C., 2021).

Los colorantes en el agua representan una amenaza ambiental y sanitaria debido a su toxicidad y posible relación con enfermedades, incluido el cáncer (Guzmán, 2018). Su estabilidad frente a tratamientos convencionales dificulta su degradación y eliminación, agravando su impacto en el ecosistema.

Se han desarrollado estudios para evaluar la eficacia de métodos no convencionales en la remoción de colorantes en aguas residuales. Entre los tratamientos más utilizados destacan los procesos químicos, como la oxidación avanzada, la ozonación y la electrocoagulación, aunque generan grandes cantidades de residuos. También se emplean métodos físicos, como la filtración y la adsorción con materiales como carbón activado y residuos agroindustriales, que pueden ser selectivos para ciertos colorantes (Bakshi *et al.*, 2020).

La norma NOM-001-SEMARNAT-2021 establece los límites máximos de contaminantes en aguas residuales para proteger su calidad. Para regular el color verdadero en los vertimientos, se basa en el coeficiente de absorción espectral máximo en relación con la longitud de onda (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Los procesos de adsorción con materiales no convencionales han mostrado avances en la remoción de colorantes en aguas residuales. Estos contaminantes, altamente recalcitrantes y perjudiciales para el medio ambiente, son ahora regulados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (García-González, 2021), que establece límites permisibles y nuevos parámetros como Demanda Química de Oxígeno, Toxicidad y Color para mejorar el control de contaminantes no biodegradables (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Las investigaciones han demostrado que los materiales adsorbentes a base de quitosano son eficaces para la remoción de colorantes en el agua, impulsando su optimización para mejorar su eficiencia, versatilidad y costo. Estudios recientes han mostrado que un solo adsorbente puede captar múltiples colorantes en un mismo proceso (Benkhayaa S., 2020). Además, el quitosano se emplea en diversas formas, como polvo, hojuelas, esferas, membranas y películas, utilizando sistemas por lotes o flujo continuo, lo que refuerza su potencial en el tratamiento de aguas residuales (Balderas-Gutiérrez, 2020).

El uso del quitosano en la eliminación de colorantes de efluentes se basa principalmente en tres factores: 1) los polímeros a base de quitosano son materiales de bajo costo obtenidos de fuentes naturales y su uso como biosorbentes es sumamente rentable, 2) su capacidad y velocidad de adsorción es alta, 3) es un material adecuado para el desarrollo de materiales complejos a base de quitosano (G.L. Dotto L. P., 2011; Balderas-Gutiérrez, 2020).

Los resultados muestran que las películas de quitosano modificadas pueden ser adsorbentes adecuados para la adsorción de colorantes. Los adsorbentes basados en quitosano son una alternativa amigable para el medio ambiente en comparación al carbón activado comercial (Vakili M., 2014; Balderas-Gutiérrez, 2020).

Es importante resaltar que el quitosano posee grupos funcionales, principalmente amino e hidroxilo, que le confieren una notable capacidad para interactuar con contaminantes de diversa naturaleza. Su estado químico puede modificarse en

INTRODUCCIÓN

función del pH y las condiciones del medio, lo que le otorga una versatilidad significativa. Gracias a estas propiedades, el quitosano puede actuar como adsorbente tanto de especies aniónicas como catiónicas. Por ello, en este trabajo se evaluará su desempeño frente a dos colorantes sintéticos representativos de estas cargas opuestas. Finalmente, este estudio se estructura en cuatro apartados principales: Fundamentos, que incluyen antecedentes científicos, la problemática asociada a los colorantes y los principios de la sorción; Método, donde se detallan la síntesis, caracterización y ensayos de adsorción; Resultados y discusión, con la presentación y análisis de los hallazgos experimentales; y Conclusiones, en las que se sintetizan las aportaciones y alcances del trabajo.

2 FUNDAMENTOS

En este apartado se presentan y analizan los trabajos previos realizados por distintos investigadores que han utilizado materiales adsorbentes similares a los empleados en este estudio, así como diversos tipos de colorantes. Se examinan las eficiencias reportadas para la remoción de estos contaminantes, junto con los métodos y técnicas aplicadas en cada caso. Además, se revisan los conceptos fundamentales y la teoría que sustentan la presente investigación, con el objetivo de establecer un marco científico sólido que contextualice y justifique el desarrollo del trabajo realizado.

2.1 Antecedentes

El creciente interés en desarrollar nuevas técnicas para la eliminación de contaminantes en aguas residuales responde a la incapacidad de los cuerpos de agua para regenerarse debido a la alta demanda industrial y doméstica (P. Sirajudheen, 2021). Estudios recientes se han enfocado en mejorar el tratamiento de contaminantes peligrosos como metales pesados, microorganismos y colorantes (W. Boumya, 2021). En particular, la industria textil genera grandes volúmenes de aguas residuales con colorantes, cuya eliminación es compleja mediante procesos convencionales (Scholz, 2018).

Dentro de los estudios y trabajos realizados para la eliminación de colorantes presentes en el agua residual, se han reportado los siguientes:

Ahmadijokani *et al.* (2023) desarrollaron nanofibras electrohiladas de quitosano/PVA modificadas con nanopartículas UiO-66 y nanodiamante oxidado, evaluándolas en la remoción de un colorante catiónico (azul de metileno) y uno aniónico (rojo Congo). Los autores estudiaron el efecto del pH, la concentración inicial (20–500 mg/L) y la fuerza iónica sobre el proceso de adsorción, identificando mecanismos dominados por interacciones electrostáticas y $\pi-\pi$ stacking según el medio. Gracias a la incorporación del material híbrido TOND-UiO-66 (1.5 Wt%), la

capacidad máxima de adsorción aumentó cerca del 80 %, pasando de 769 a 1429 mg/g, además de presentar buena estabilidad y reutilización durante al menos seis ciclos de adsorción-desorción. Este trabajo evidencia la eficiencia del quitosano modificado frente a contaminantes de distinta naturaleza, así como la importancia de las condiciones de operación en su desempeño como adsorbente (Ahmadijokani et al., 2023).

Albishri & Katouah (2023) sintetizaron nanoestructuras de hidróxido de silicato de sodio y magnesio mediante un método hidrotermal y luego las modificaron con quitosano para crear un nanocompuesto. Evaluaron su capacidad de adsorción frente a dos colorantes catiónicos, el azul de metileno y el violeta cristal. Bajo condiciones óptimas a un pH = 8, tiempo de contacto de 50 minutos y temperatura de 298 K, obtuvieron una capacidad máxima de 19,07 mg/g para el azul de metileno con las nanoestructuras no modificadas, y de 20,25 mg/g con el nanocompuesto quitosano-silicato. Además, demostraron que la adsorción se debe principalmente a la atracción electrostática entre los grupos amino ($-\text{NH}_2$) e hidroxilo ($-\text{OH}$) del quitosano y los tintes en un medio básico (Albishri & Katouah, 2023).

Rajendiran et al. (2022) diseñaron un material heterogéneo compuesto por óxido de grafeno (GO) y quitosano injertado con nanobarras de $\alpha\text{-MnO}_2$, para la eliminación de colorantes industriales tóxicos. En su estudio evaluaron tanto un colorante catiónico (methylene blue, MB) como uno aniónico (Amido Black 10B, AB), demostrando una afinidad especialmente alta por el MB. Las pruebas se llevaron a cabo con una concentración inicial de MB de \sim 30 mg/L, logrando una eliminación del 97 % en tan solo 24 minutos, mientras que para AB la remoción alcanzó el 80 % tras unos 700 minutos. A partir de la isoterma de Langmuir, calcularon una capacidad máxima teórica para MB de 328,9 mg/g, atribuida al incremento de sitios funcionales (grupos oxigenados), la basicidad y la fuerte atracción electrostática generada por las nanobarras de MnO_2 sobre la superficie de GO-quitosano. Además, evaluaron la estabilidad del adsorbente: el material mostró buen desempeño tras 10 ciclos sucesivos de adsorción (Rajendiran et al., 2022).

Zhang *et al.* (2018) sintetizaron esferas compuestas de quitosano/grafeno (CS/GNPs) mediante un método simple de reticulación. Evaluaron la adsorción de colorantes aniónicos ácidos, específicamente naranja de metilo (MO) y rojo ácido 1 (AR1), bajo diferentes valores de pH y porcentajes de GNPs. La capacidad máxima de adsorción reportada fue de 230,91 mg/g para MO y 132,94 mg/g para AR1. Además, las esferas se pudieron regenerar eficientemente después de la saturación, con una pérdida mínima de capacidad (Zhang C., 2018).

Omidi & Kakanejadifard (2018) desarrollaron un aerogel de grafeno-quitosano mediante reticulación con glutaraldehído a temperatura ambiente, y lo utilizaron para remover rojo Congo, un colorante aniónico. Realizaron experimentos variando la concentración inicial, el pH y el tiempo de contacto. Su aerogel mostró una capacidad máxima de adsorción de 384,62 mg/g según la isoterma de Langmuir, y mantuvo aproximadamente el 100 % de su capacidad inicial tras tres ciclos de adsorción-desorción (Omidi & Kakanejadifard, 2018).

Lai *et al.* (2019) prepararon un aerogel de óxido de grafeno/quitosano (GOCA) mediante técnica de “ice-templating” sin usar agente reticulante. Evaluaron la adsorción del colorante amarillo de metanilo (metanil yellow), variando la masa del adsorbente, el pH, la concentración inicial, la velocidad de agitación, el tiempo de contacto y la temperatura. Encontraron una capacidad máxima de 430,99 mg/g, con una eficiencia de remoción entre 91,5 % y 96,4 % para un pH entre 3 y 8. El experimento óptimo se dio con 8 mg de adsorbente, 400 mg/L de colorante, 35.19 min de contacto y 175 rpm de agitación. Además, el aerogel se regeneró por 5 ciclos, manteniendo el 80 % de su capacidad (Lai *et al.*, 2019).

Balderas-Gutiérrez (2020) estudió películas de quitosano y quitosano-glicerol tratadas mediante plasma de descarga luminiscente para la remoción de los colorantes Rojo No. 2 y Amarillo No. 5, ambos pertenecientes al grupo de los colorantes azoicos aniónicos. Durante la síntesis, las películas fueron expuestas a un voltaje de 1.57 kV, una corriente de 0.74 A y una frecuencia de 5.4 kHz, con

tiempos de tratamiento de 20, 40 y 60 minutos. Las pruebas de adsorción se realizaron a pH ajustado (≈ 2.5) utilizando soluciones de 250 mg/L de colorante, bajo diferentes temperaturas (10 °C, 30 °C y 50 °C) y condiciones de agitación. Los materiales tratados mostraron capacidades de adsorción notablemente altas, alcanzando 1073 mg/g para Rojo No. 2 y 1020 mg/g para Amarillo No. 5. Adicionalmente, se evaluó la cinética de adsorción y la variación de pH durante el proceso de contacto (Balderas-Gutiérrez, 2020).

Lewis & Wilson (2020) estudiaron películas compuestas de quitosano/PVA (porciones variables chitosan:PVA) y evaluaron su capacidad de adsorción frente a methylene blue (MB, colorante catiónico) y p-nitrophenol (PNP, un compuesto que puede comportarse como neutro o aniónico según el pH); las pruebas se realizaron a 298 K y con una concentración inicial reportada de $C_0 = 20 \mu\text{M}$, variando el pH (se muestran resultados a pH ≈ 5 y pH 9) para investigar el efecto del estado de protonación de la película sobre la captura del tinte. Encontraron que MB presenta afinidad significativa por las películas (la adsorción aumenta con el contenido de quitosano y es mayor a pH alcalino), mientras que PNP mostró una adsorción despreciable en las condiciones probadas; además, los autores caracterizaron la estabilidad física y térmica de las películas (ensayos de hinchamiento, TGA y degradación) y no reportaron protocolos de regeneración del adsorbente en el artículo. Estos resultados indican que las películas quitosano-PVA son candidatas prometedoras para la remoción de colorantes catiónicos como MB, pero su eficacia frente a solutos neutros o aniónicos depende fuertemente del pH y de la composición de la película (Balderas-Gutiérrez, 2020).

Alvarado-Bonifacio *et al.* (2018) modificaron perlas de quitosano/PVA reticuladas (tamaños de 1, 2 y 3 mm) mediante plasma de descarga luminiscente (240 mA a 5 kHz, en solución de Na_2SO_4) con tiempos de exposición de 30, 60 y 90 min. Luego evaluaron su capacidad de adsorción para el colorante Rojo 2, un tinte azoico aniónico, usando lotes de 30 mg de perlas en 10 mL de una solución de 255 mg/L a pH entre 2 y 7, agitando a 200 rpm y 30 °C durante 72 h. La medición del colorante

residual se realizó por espectroscopía UV-Vis. Las perlas modificadas alcanzaron capacidades máximas de adsorción de hasta 1509 mg/g (para las perlas de 1 mm), siendo menores para las de mayor tamaño (857 mg/g para 2 mm, 814 mg/g para 3 mm), lo que indica una mejora marcada versus las no tratadas. Además, las perlas modificadas mostraron una capacidad de adsorción más estable con respecto al cambio de pH, mientras que en las no modificadas la eficiencia cayó al aumentar el pH inicial (Alvarado-Bonifacio et al., 2018).

Ayala-Gutiérrez *et al.* (2023) evaluaron distintas condiciones de síntesis de películas a base de quitosano orientadas a la adsorción del colorante Azul No. 1, un tinte aniónico ampliamente utilizado en la industria alimentaria. En su estudio se variaron parámetros como la concentración del biopolímero, el tipo de ácido solvente y las condiciones de secado, analizando la respuesta adsorbente bajo soluciones preparadas a concentración controlada y pH ajustado, con cuantificación por espectrofotometría UV-Vis. Posteriormente, Ayala-Gutiérrez *et al.* (2025) profundizaron en el efecto del espesor de la película de quitosano sobre la adsorción del colorante tartrazina (Amarillo No. 5), también de naturaleza aniónica, empleando películas de diferentes grosores obtenidas por casting y evaluadas en condiciones de lote a temperatura ambiente, con variación de pH y análisis por FTIR para identificar cambios estructurales durante el proceso de adsorción. En este segundo estudio, se observó que un espesor menor favorece una mayor capacidad de adsorción debido al incremento en la disponibilidad de sitios activos y a una mayor transferencia de masa, lo que confirma la relevancia de los parámetros de síntesis en el desempeño del quitosano para la remoción de colorantes aniónicos. (Ayala-Gutiérrez *et al.*, 2023; Ayala-Gutiérrez, *et al.*, 2025).

Los estudios analizados demuestran que los materiales basados en quitosano presentan una notable versatilidad para la remoción de colorantes de distinta naturaleza. En general, estos adsorbentes muestran alta afinidad por colorantes aniónicos (por ejemplo, rojo ácido 1, rojo congo, tartrazina, amarillo de metanilo) bajo condiciones ácidas, donde la protonación de los grupos amino del quitosano

favorece las interacciones electrostáticas. Por otro lado, los materiales híbridos de quitosano con grafeno, óxidos metálicos, nanopartículas o polímeros tienden a mejorar la adsorción de colorantes catiónicos como azul de metileno y cristal violeta, especialmente en medios neutros o ligeramente básicos, donde predominan sitios activos desprotonados y superficies con carga negativa. La literatura también reporta el uso de quitosano en múltiples presentaciones como perlas, películas, hidrogeles, aerogeles, fibras y materiales reticulados o injertados, que permiten ajustar su desempeño según el tipo de colorante y las condiciones del sistema, consolidándolo como un adsorbente altamente adaptable para el tratamiento de aguas contaminadas.

La utilización de agua contaminada con colorantes puede tener efectos adversos significativos para la salud humana, incluyendo problemas respiratorios, represión inmunológica, reacciones alérgicas, trastornos en el sistema nervioso central (SNC), infecciones oculares y dérmicas, problemas de conducta y necrosis tisular (Gallego C., 2021). La degradación incompleta de los tintes produce compuestos mutagénicos y cancerígenos como aminas e iminas, cuya exposición puede tener impactos perjudiciales en los organismos vivos. Los tintes son resistentes a la biodegradación, lo que hace que su eliminación de los sistemas acuáticos sea un desafío (Mateos M., 2012). En este contexto, la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites máximos de contaminantes en aguas residuales para proteger la calidad del agua, especificando el límite de calidad para color en agua basado en el coeficiente de absorción espectral máximo y la longitud de onda, para medir y controlar los parámetros de color permitido en el agua (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

La eliminación de colorantes de los efluentes de aguas es crucial para prevenir efectos negativos en los cuerpos de agua. El proceso de adsorción, como tratamiento de aguas, requiere el desarrollo de adsorbentes adecuados para tratar muestras reales contaminadas. Estos adsorbentes deben ser reutilizables y estables en diversas condiciones, y es esencial comprender los ciclos de adsorción-

desorción para evaluar su viabilidad en aplicaciones industriales (Benkhaya *et al.*, 2020).

En cuanto al quitosano, su uso en la fabricación de películas ha demostrado ser una excelente alternativa. Al combinarlo con otros compuestos como aceites esenciales, plastificantes y nanopartículas metálicas, se potencian sus propiedades, mejorando su biocompatibilidad y características físicas. Esto posiciona al quitosano como un biopolímero eficaz y sostenible para diversas aplicaciones (Espinosa-Cavazos *et al.*, 2020).

Los adsorbentes a base de quitosano son altamente eficientes en el tratamiento de aguas residuales debido a su alta superficie de contacto, estabilidad fisicoquímica y porosidad. Los biopolímeros de quitosano modificados superficialmente juegan un papel clave en la eliminación de colorantes tóxicos en aguas residuales. La modificación de la superficie con compuestos orgánicos e inorgánicos aumenta la cantidad de sitios activos, mejorando la interacción entre el colorante y el adsorbente, lo que optimiza el proceso de adsorción (Beck, 2019).

Por lo antes mencionado, el presente trabajo consiste en estudiar la adsorción de un colorante catiónico presente en el agua utilizando películas a base de quitosano y verificar la eficacia de la película contra la adsorción de un colorante aniónico.

2.2 Contaminación del agua por colorantes

El recurso hídrico es esencial para la supervivencia humana, pero enfrenta una grave crisis debido a la contaminación. Un problema destacado es la generación de aguas residuales, especialmente las provenientes del teñido industrial. Desde el siglo pasado, el crecimiento de la industria textil ha incrementado la liberación de colorantes en el medio ambiente (Huang *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2019).

Estos compuestos químicos son ampliamente utilizados en diversos sectores como textiles, cuero, papel y plásticos. Se estima que más de 10,000 colorantes se

emplean en la industria, con una producción anual de 0.7 millones de toneladas. La fabricación textil consume grandes volúmenes de agua, con hasta 1.6 millones de litros diarios en fábricas de tamaño medio, lo que agrava la crisis hídrica global (Zhou et al., 2019).

2.2.1 Efectos adversos sobre la fauna, flora y los seres humanos

Los colorantes en cuerpos de agua generan graves impactos ecológicos y en la salud humana (Vikrant et al., 2018). Afectan el equilibrio ambiental al reducir el oxígeno disuelto, bloquear la luz solar y aumentar la demanda de oxígeno (Berradi et al., 2019). También contribuyen a la eutrofización al liberar nitratos, nitritos y fosfatos, alterando la turbiedad, temperatura y pH del agua. En términos de salud, pueden ser mutagénicos, cancerígenos y teratogénicos, afectando órganos como el hígado, riñón, cerebro y el sistema nervioso central, además de causar alergias e irritaciones en la piel (Zhou et al., 2019). Estudios han demostrado su alta toxicidad, aumentando la mortalidad en diversas especies acuáticas (Zhou et al., 2019).

2.2.2 Métodos de remoción de colorantes

Para el tratamiento de aguas residuales de teñido, se han desarrollado diversas técnicas físicas, químicas y biológicas, pero los tintes son altamente resistentes a la degradación. La adsorción se ha consolidado como una de las soluciones más eficientes y económicas, con el carbón activado como adsorbente convencional. Sin embargo, su alto costo y los complejos procesos de regeneración han limitado su uso (Huang et al., 2021; Liu et al., 2023). Por ello, en las últimas décadas se han investigado y desarrollado nuevos adsorbentes como arcillas, zeolitas, biosorbentes, residuos agrícolas, subproductos industriales y materiales multifuncionales, mejorando la eliminación de colorantes en aguas residuales.

Desde el descubrimiento de los efectos secundarios de los colorantes, se han implementado diversos métodos para tratar las aguas residuales generadas por el teñido. Estos métodos incluyen técnicas físicas, químicas y biológicas como la coagulación, floculación, separaciones de membrana, adsorción, intercambio

iónico, oxidación, procesos de oxidación avanzada, electroquímica, fotocatálisis y biodegradación. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas, que se detallan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de eliminación de colorantes (Zhou *et al.*, 2019).

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Separación por membrana	Sales de reutilización de alta eficiencia.	Vida útil corta, económicamente inviable.
Adsorción	Alta eficiencia, proceso de operación simple, bajo costo, no formará sustancias peligrosas.	Ineficaz para ciertos tintes, la regeneración es costosa, la eliminación de residuos adsorbentes también es un problema, la pérdida de adsorbentes.
Intercambio de iones	Sin pérdida de adsorbentes.	Económicamente poco atractivo, ineficaz para ciertos tintes.
Coagulación/flocculación	Sencillo, económicamente atractivo.	Alta producción de lodos y problemas de su eliminación.
Proceso oxidación avanzada	Alta eficiencia, rápido.	Producción de lodos, económicamente inviable, usa reactivos y consumo de electricidad, formación de subproductos.
Proceso electroquímico	Alta eficiencia, rápido.	Alto consumo eléctrico y económicamente inviable.
Proceso fotoquímico	Sin producción de lodos, rápido.	La formación de subproductos y el consumo de energía
Biodegradación	Económicamente atractivo y sencillo.	Requiere estrictas condiciones ambientales externas, proceso lento, ocupar un área determinada de tierra.

El tratamiento biológico de aguas residuales es una opción ecológica y sencilla, que utiliza microorganismos para decolorar colorantes sintéticos en condiciones aerobias o anaerobias. Sin embargo, requiere condiciones ambientales específicas y puede ser complejo y lento. Además, su eficiencia es a menudo insatisfactoria

debido a la resistencia de los tintes sintéticos a la biodegradación, y la producción de lodo es un inconveniente (Ngulube et al., 2017).

Por otro lado, los métodos químicos son eficaces, pero costosos, ya que consumen grandes cantidades de reactivos y energía, y pueden generar residuos tóxicos que causan contaminación secundaria (Wang et al., 2023). Esto los hace menos atractivos comercialmente.

La separación por membrana es otra tecnología eficiente, aunque su uso en el tratamiento de aguas residuales de teñido es limitado debido a la corta vida útil de las membranas y su propensión a la contaminación. En contraste, la adsorción se destaca como el método más utilizado por su simplicidad, bajo costo y efectividad, sin generar sustancias peligrosas, aunque aún enfrenta desafíos por resolver (Zhou et al., 2019).

2.2.3 Colorantes concepto y clasificación

Los colorantes son compuestos orgánicos complejos que absorben luz y dan color a diversos materiales, como textiles, papel y piel. Hasta el siglo XIX, se extraían de recursos naturales, pero el descubrimiento de la anilina morada en 1856 marcó el inicio de la producción de colorantes sintéticos, que son más económicos y ofrecen una amplia gama de colores (Gallego-Ramírez et al., 2022).

Químicamente, los colorantes se componen de un cromóforo, que es el grupo responsable de la absorción de luz, y un auxócromo, que modifica las longitudes de onda de absorción (Corrales Ramírez & Caycedo Lozano, 2020). Los colorantes se pueden clasificar en naturales y sintéticos, siendo estos últimos los más utilizados en la industria textil debido a su alta solubilidad y variedad de colores. Los colorantes sintéticos se dividen en iónicos (catiónicos y aniónicos) y no iónicos (dispersos y de tina) (Yagub et al., 2014).

Los colorantes catiónicos tienen carga positiva y son solubles en agua, mientras que los aniónicos, que incluyen colorantes ácidos, reactivos y directos, tienen carga negativa y también son solubles (Sriram et al., 2020). Los colorantes no iónicos, como los dispersos, son menos solubles y se aplican a fibras hidrofóbicas (Benkhaya et al., 2020). En resumen, los colorantes son esenciales en diversas aplicaciones, especialmente en la industria textil, donde su clasificación y propiedades químicas son fundamentales para su uso efectivo (Benkhaya et al., 2020).

2.2.4 Amarillo 57

El colorante amarillo 57 se emplea en la industria cosmética para productos como sales de baño, maquillaje, rímel, tintes para el cabello y esmaltes de uñas, así como en pinturas, barnices, arcillas para modelar, tintas de impresión y plásticos. Su estructura química incluye unidades de bifenilo con cloro, grupos azo y anillos de fenilo, conectados por un enlace amida. La figura 2.1 ilustra la estructura de la molécula de amarillo 57.

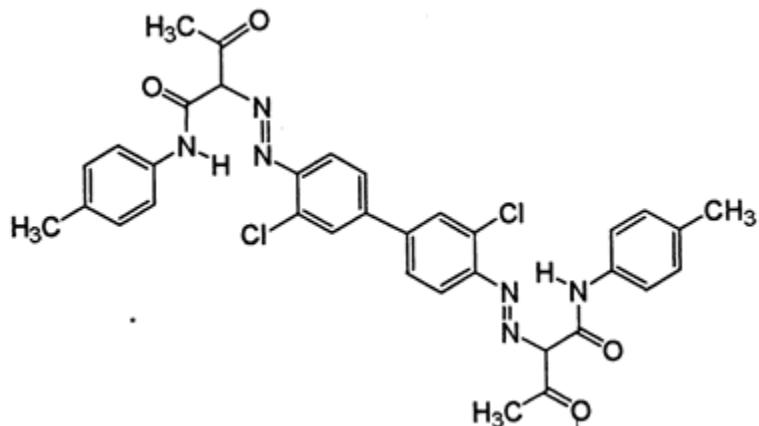


Figura 2.1 Estructura del colorante amarillo 57.

El colorante amarillo 57 tiene como fórmula molecular $\text{C}_{34}\text{H}_{30}\text{Cl}_2\text{N}_6\text{O}_4$, también se puede encontrar con el nombre de amarillo básico 57 o cloruro de trimetil-[3-[(3-metil-5-oxo-1-fenil-4H-pirazol-4-il)diazenil]fenil]azanio; su peso molecular es de 657.55 g/mol.

La exposición prolongada puede provocar inflamación crónica, irritación y los consiguientes efectos pueden ser cancerígenos con afectaciones en el tracto respiratorio (Hartwig, 2021).

2.2.5 Amarillo 5

La tartrazina, también conocida como FD&C Yellow 5 o E102, tiene una fórmula química $C_{16}H_{9}N_4Na_3 - O_9S_2$, y su estructura química (figura 2.2) es trisódica1-(4-sulfonatofenil)-4-(4 (sulfonatofenilazo)-5-pirazolona-3-carboxilato). Es un colorante azoico de color amarillo que está presente como aditivo en muchos alimentos procesados, incluidos dulces, chips de maíz, refrescos, productos horneados y salmueras de pepinillos. Su función es enteramente estética, ya que no tiene sabor ni beneficios nutricionales. La tartrazina se ha relacionado con efectos adversos en humanos, incluido el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH) respuestas inflamatorias, reacciones alérgicas, toxicidad hepática, defectos de aprendizaje/ memoria (Ali et al., 2022). Sin embargo, cuando se usa en dosis altas, es muy tóxico y causa problemas a los humanos, como cáncer de tiroides, eccema, migrañas, asma, lupus, infertilidad; por lo tanto, las aguas residuales que contienen tartrazina en concentraciones variables deben tratarse antes de su vertido. (Ali et al., 2022).

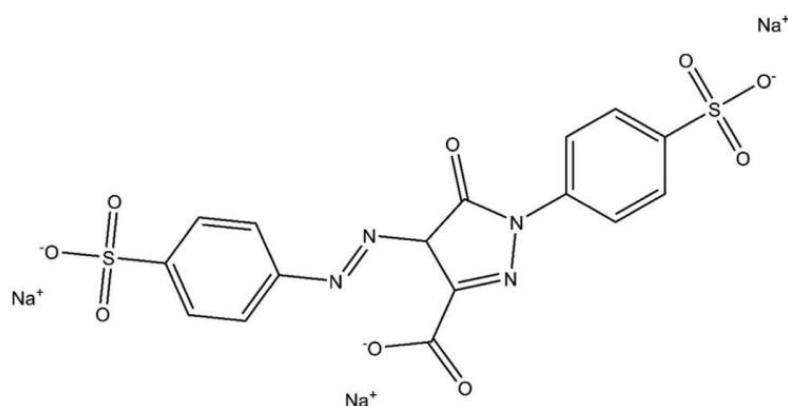


Figura 2.2 Estructura del colorante amarillo 5.

2.2.6 Cuantificación de los colorantes

La espectrofotometría UV-Vis es una técnica analítica que estudia cómo la materia absorbe radiación ultravioleta o visible, permitiendo identificar compuestos y determinar su concentración (García-González *et al.*, 2020). Cuando un haz de luz de intensidad I_0 atraviesa una solución que contiene un compuesto que absorbe luz, parte de la radiación es absorbida y otra parte es transmitida, por lo que $I = I_a + I_T$ (Skoog *et al.*, 2018). La absorción a distintas longitudes de onda genera un espectro, que funciona como una “huella” del compuesto. Su cuantificación se basa en la Ley de Lambert-Beer, que relaciona absorbancia y concentración mediante:

$$A = \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

donde A es la absorbancia, ε el coeficiente de extinción, c la concentración y l la longitud de paso de la luz. La energía radiante es inversamente proporcional a la longitud de onda: a mayor λ , menor energía, y viceversa (Sridharan, 2016). La ley también aplica a mezclas siempre que no haya interacción entre los componentes, de modo que la absorbancia total es la suma de las absorbancias individuales:

$$A_{total} = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \varepsilon_1 b c_1 + \varepsilon_2 b c_2 + \dots + \varepsilon_n b c_n \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

Donde los subíndices, se refieren a los componentes absorbentes 1, 2, ..., n (Skoog *et al.*, 2018).

2.3 Sorción

La sorción incluye procesos como adsorción, absorción, desorción, intercambio iónico, disolución y precipitación, y se define como el movimiento de sustancias o el aumento de concentración de un soluto de una fase a otra. En el proceso de adsorción, las partículas se adhieren a la superficie del sorbente, mientras que, en la absorción, el sorbato se introduce en el interior del sorbente. En el intercambio iónico, se produce una rotación de compuestos. La figura 2.3 ilustra estos conceptos (Sawyer *et al.*, 2001).



Figura 2.3 Diferentes procesos de Sorción.

En los procesos de sorción, se pueden clasificar diferentes tipos según la naturaleza de la atracción entre las moléculas del sorbente y del soluto. El soluto se refiere a la fase dispersora, mientras que el sorbente es la fase dispersante, es decir, el medio en el que se distribuye el soluto (Sawyer *et al.*, 2001).

2.3.1 Adsorción

La adsorción es un proceso de transferencia de fases utilizado para eliminar sustancias de fluidos (gases o líquidos) al fijarlas en la superficie de un sólido o líquido (Sawyer *et al.*, 2001). Es un mecanismo eficiente en el tratamiento de agua, donde solutos son retenidos en superficies sólidas. Los adsorbentes poseen sitios activos con distintas energías que interactúan con los solutos. La reversión de este proceso se llama desorción. La eficacia de un adsorbente depende de su área superficial, siendo materiales altamente porosos los más utilizados; en la teoría de la adsorción, se utilizan los términos básicos que se muestran en la figura 2.4. (Worch & Eckhard, 2012).

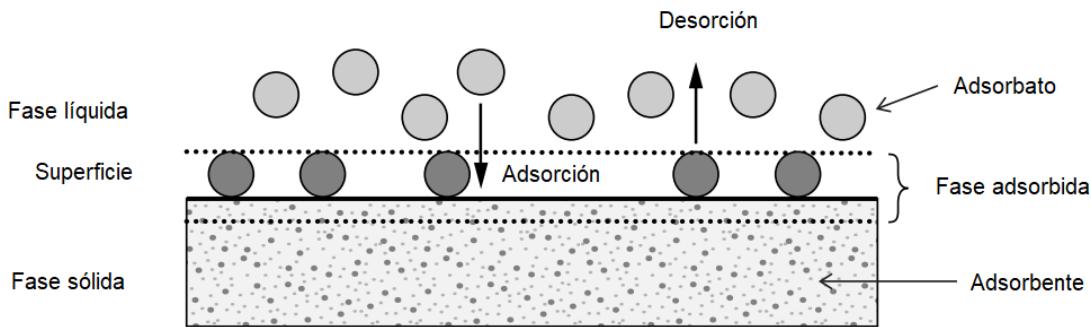


Figura 2.4 Términos básicos de adsorción.

La adsorción tiene gran importancia tecnológica y se aplica en desecantes, catalizadores, separación de gases, purificación de líquidos y control de contaminación. Se emplean adsorbentes como carbón activado, alúmina activada y zeolitas para eliminar sustancias del agua mediante fuerzas electrostáticas o de Van der Waals. Existen dos tipos de adsorción: fisisorción, que es débil, reversible y similar a la condensación, y quimisorción, que es más fuerte, específica e involucra enlaces químicos (Rouquerol F., 1999; Hidalgo J. L., 2015; Arcos, 2016; Worch & Eckhard, 2012).

a) Factores que influyen en la sorción

Diversos parámetros influyen en la sorción (Sawyer *et al.*, 2001):

- **Capacidad vs. cinética:** La capacidad de sorción depende del equilibrio del soluto, mientras que la cinética (temperatura, presión, viscosidad) afecta solo la velocidad del proceso.
- **Área de contacto:** A mayor superficie, mayor capacidad de sorción.
- **Tamaño de poro:** Una distribución adecuada facilita el transporte del soluto.
- **Tamaño de partículas:** Partículas más pequeñas aceleran la sorción.
- **Concentración del soluto:** Una mayor concentración impulsa el proceso.
- **pH:** Un pH ligeramente ácido mejora la solubilidad y la sorción.

- **Tiempo de contacto:** Es necesario un tiempo óptimo para alcanzar el equilibrio y maximizar la eficiencia.

b) Equilibrio de adsorción

En el equilibrio de adsorción existe una proporción definida de soluto repartida entre las dos fases, líquida y sólida. La forma habitual de expresar esta distribución es la capacidad de adsorción al equilibrio, definida como:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} * V \quad \text{Ecuación 2. 3}$$

Siendo q_e la capacidad de adsorción al equilibrio, que informa de la concentración de adsorbato en fase sólida, C_0 es la concentración inicial de adsorbible en fase líquida, C_e es la concentración de adsorbible en fase líquida en el equilibrio, V es el volumen de disolución y W es la masa de adsorbente (García-González, 2021; Worch & Eckhard, 2012).

c) Cinética de adsorción

El diseño de equipos de adsorción requiere conocer tanto el equilibrio del proceso como su cinética, determinada por la difusividad del adsorbato en el sólido poroso. Existen modelos matemáticos para caracterizar la adsorción, desde los que ajustan datos experimentales hasta modelos físicos más complejos que describen la difusión interna. Estos modelos permiten analizar la velocidad del proceso y los mecanismos de reacción.

Entre los modelos más utilizados están:

Pseudo-primer orden (Lagergren): Basado en la asignación de un sitio de adsorción por ión.

Pseudo-segundo orden (Ho y Mckay): Considera la adsorción como un proceso químico.

Modelo de Elovich: Aplicado a la quimisorción en superficies heterogéneas.

La aplicación de estos modelos y su respectivo ajuste, permiten asumir el comportamiento de los datos experimentales. Con respecto a estos se muestran los modelos típicos usados a continuación (García-González, 2021).

Tabla 2.2 Modelos de adsorción cinéticos.

Modelo	Pseudo 1er orden	Pseudo 2do orden	Elovich
Diferencial	$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t)$	$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t)^2$	$\frac{dq}{dt} = \beta e^{-\alpha q_t}$
Integral	$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t})$	$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t}$	$q_t = \alpha \ln(\alpha \beta) + \beta \ln(t)$

Ecuación 2. 4 PPO

Ecuación 2. 5 PSO

Ecuación 2. 6 Elovich

Donde q_e es la capacidad de adsorción al equilibrio, (cantidad de adsorbato / cantidad de adsorbente), q_t es la capacidad en el tiempo t , t es el tiempo de contacto, K_1 y K_2 es la constante de pseudo primer orden y pseudo segundo orden respectivamente, α es la constante de adsorción inicial, β es la constante de desorción durante el experimento (García-González, 2021).

d) Isoterma de adsorción

Las isotermas de adsorción son curvas construidas a partir de pares (C_e , q_e) a una temperatura constante. Pueden ocurrir varios tipos de relaciones isotérmicas de adsorción (Balderas-Gutiérrez, 2020).

a) Isoterma de Langmuir

Langmuir fue el primero en proponer una teoría coherente de adsorción sobre una superficie plana desde un punto de vista cinético, explicando el fenómeno como un

proceso dinámico en el que las moléculas del adsorbato colisionan continuamente (“bombardeo”) contra la superficie del adsorbente, adsorbiéndose mientras otras se desorben a la misma velocidad en equilibrio. Este modelo asume que la adsorción ocurre en un número finito de sitios específicos, energéticamente equivalentes y distribuidos de manera uniforme.

La isoterma de Langmuir describe una adsorción en monocapa, donde cada sitio activo puede retener únicamente una molécula y no existe interacción entre moléculas adsorbidas en sitios vecinos. Esto implica un proceso controlado principalmente por interacciones adsorbato–sitio activo, característico de mecanismos próximos a una adsorción de tipo quimisorción o fisisorción altamente localizada, dependiendo del sistema. El modelo supone, además, que la adsorción finaliza una vez que todos los sitios están ocupados, por lo que la capacidad máxima del adsorbente es fija y definida por la formación de esta monocapa.

$$q_e = \frac{q_{sat} * b * C_e}{1 + b * C_e} \quad \text{Ecuación 2. 7}$$

b) Isoterma de Freundlich

Se utiliza en sistemas en los que la superficie de adsorción es energéticamente heterogénea. La ecuación empírica que describe el modelo de Freundlich tiene por expresión:

$$q_e = k_F * C_e^{1/n_F} \quad \text{Ecuación 2. 8}$$

c) Isoterma de Sips (Langmuir-Freundlich)

La idea de este modelo fue dotar al modelo de Freundlich de un límite finito cuando la concentración fuese lo suficientemente alta. La diferencia con el modelo de Langmuir es un parámetro adicional n ; cuando $n=1$ se simplifica a la isoterma de Langmuir. Por tanto, puede definirse n como un parámetro de la heterogeneidad de

la superficie: esta heterogeneidad puede ser debida tanto a la superficie del adsorbente, como al adsorbato o a ambos. Este parámetro n suele ser mayor que la unidad, y cuanto mayor es, mayor es la heterogeneidad del sistema. Comparte con la ecuación de Freundlich el no cumplir la ley de Henry a bajas presiones.

$$q_e = \frac{q_{sat}(b \cdot C_e)^{1/n}}{1 + (b \cdot C_e)^{1/n}} \quad \text{Ecuación 2. 9}$$

Donde b y $1/n$ son dependientes de la temperatura, y q_{sat} puede ser tomado como función o no de la misma (García-González, 2021).

2.4 Modelos de dinámica molecular

2.4.1 Modelos de transferencia de masa

La interacción sorbato-adsorbente es solo el fenómeno interfase, no obstante, resulta fundamental examinar la difusión a través de los poros del material adsorbente, este fenómeno es denominado transferencia de masa. Estos fenómenos permiten describir la cinética de adsorción de gases y líquidos en materiales. Existen elementos sólidos tales como monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxido nitroso, acetileno y disulfuro de carbono en carbón (García-González, 2021).

2.4.2 Modelo de Crank

El modelo de Crank representa la solución analítica de la ecuación de la segunda Ley de Fick (predice que la concentración de una especie se altera con el transcurso del tiempo). Una vez que la resistencia a la transferencia de masa externa es despreciable, la partícula adsorbente se encuentra inicialmente libre de soluto y la concentración del soluto en la superficie permanece constante. Este modelo es válido en el supuesto de que existe un "baño infinito" en el que la concentración es muy alta, lo que justifica que, en la superficie del adsorbente, la concentración es constante. En tal sentido, se presenta la ecuación de la ecuación.

La difusión de una partícula esférica es:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \left(\frac{D_e}{r^2}\right) \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial q}{\partial r}\right) \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Utilizando las condiciones iniciales y de frontera (Ecuación 1.9), se obtiene el modelo de Crank (Ecuación 1.10):

$$qr = \left[\sum_{i=1}^N \frac{z_i}{q_i^0(\pi)} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 2. 11}$$

Condiciones fronteras:

$$q(0,0) = 0$$

$$q(r,t) = q_e$$

$$\frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

$$\frac{q}{q_e} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left(-\frac{D_e n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)} \quad \text{Ecuación 2. 12}$$

Donde q es la capacidad de adsorción al tiempo t (mg/g), q_e es la capacidad de adsorción al equilibrio (mg/g), r es el radio de la partícula (m), D_e es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s) y t es el tiempo (h) (García-González, 2021).

2.4.3 Correlación de Wilke-Chang

La correlación de Wilke-Chang puede usarse para la mayoría de los propósitos generales cuando el soluto (A) está diluido con respecto al disolvente (B).

$$D_{AB} = 1.173 \times 10^{-16} (\varphi M_B)^{1/2} \frac{T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad \text{Ecuación 2. 13}$$

donde M_B es el peso molecular del disolvente B, μ_B es la viscosidad de B en $\text{Pa}^* \text{s}$ o $\text{kg/m}^* \text{s}$, V_A es el volumen molar del soluto en el punto de ebullición, que se puede

obtener de tablas de volúmenes atómicos y molares en el punto de ebullición normal y χ_{p} es un “parámetro de asociación” del disolvente: 2.6 para el agua, 1.9 para el metano, 1.5 para el etanol, 1.0 para el benceno, 1.0 para el éter, 1.0 para el heptano y 1.0 para los disolventes sin asociación (Geankoplis, 1998).

2.5 Adsorbentes más comunes

Existe multitud de materiales que se pueden utilizar como adsorbentes. Sin embargo, la elección de uno u otro dependerá principalmente de la aplicación. No obstante, existe una serie de características que se le piden al adsorbente ideal, tales como bajo precio, resistencia mecánica y química, abundancia, fácil manejo, fácil regeneración, alta capacidad de adsorción, alta superficie específica, etc. Por supuesto, no es fácil que un material reúna todas estas características simultáneamente. Existen muchos materiales adsorbentes en el mercado (Mateos, 2012):

- Materiales carbonosos: Carbón activado, Nanofibras de carbono, Nanotubos de carbono, Xerogeles de carbón, Carbones mesoporosos ordenados.
- Arcillas
- Bentonita
- Tierra de Fuller
- Caolinita
- Hidrotalcita
- Sepiolita
- Otros adsorbentes
- Gel de sílice.
- Silicalita
- Alúmina
- Bioadsorbentes

Los biosorbentes, son materiales compuestos de biomasa derivados de seres vivos, en el caso de plantas puede ser materia viva o muerta, estos materiales contienen

en su estructura sitios activos y/o iones que permiten la interacción con elementos en su ambiente en el que están presentes y que pueden retener en su estructura determinados compuestos por mecanismos de sorción físicos, químicos o de intercambio iónico, entre ellos se estudian compuestos como quitosano, celulosa, desechos orgánicos con propiedades porosas (García-González, 2021).

Dentro de los bioadsorbentes se encuentra el quitosano, el cual se obtiene a partir de la quitina. La quitina (figura 2.5) es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa, compuesta por unidades de poli [β -(1-4)-2-acetamida-2-desoxi-D-glucopiranosa] como se muestra en la figura 1.3, una de las características importantes de la quitina es que posee una estructura lineal con alto peso molecular e insoluble en agua, esta última característica limita sus aplicaciones (Ren L., 2017).

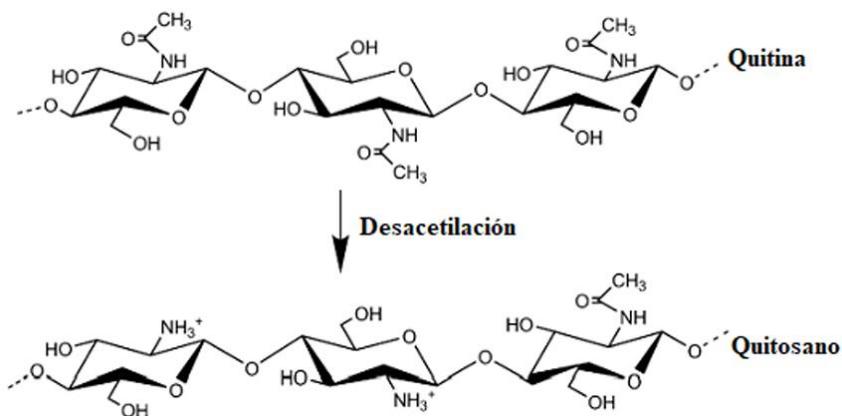


Figura 2.5 Estructura de la quitina, quitosano y proceso de desacetilación (Nilsen-Nygaard *et al.*, 2015).

Hoy en día, la quitina se extrae por métodos químicos de los caparazones de crustáceos como el camarón, langosta y cangrejo. Por otro lado, el quitosano es un biopolímero catiónico lineal derivado de la desacetilación (figura 2.5) de la quitina en un medio alcalino altamente concentrado a temperaturas mayores a los 60°C. En esta reacción ocurre la pérdida del grupo acetilo de la amida, dejando en su lugar

un grupo amino, obteniéndose como producto el quitosano con propiedades considerablemente diferentes a la quitina. En forma natural el quitosano se puede encontrar en la pared celular de hongos y algas verdes, aunque en menores proporciones. El quitosano está compuesto por unidades de poli[β -(1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranosa] como se muestra en la figura 1.5 (Bakshi et al., 2020).

Actualmente el quitosano sigue siendo considerado un material muy prometedor para varias aplicaciones debido a diversas causas: su ventaja económica al provenir de una fuente natural renovable por ser un subproducto de la industria pesquera, no es tóxico, es biocompatible, biodegradable, bioactivo, y además presenta actividad antimicrobiana (Ahmed M.J., 2020).

2.5.1 Propiedades del quitosano

Este polímero natural es el único polisacárido alcalino presente en la naturaleza ya que los otros son de naturaleza neutra o ácida. Este material es inodoro, no es tóxico y tiene dentro de sus características más sobresalientes su alta biodegradabilidad, ya que se descompone en productos inofensivos como azúcares que son absorbidos por el cuerpo, es importante mencionar las características atribuidas a este material incluyendo sus propiedades químicas y físicas las cuales dependen de diferentes factores como el pH, peso molecular, grado de des acetilación, grado de cristalinidad, grado de ionización y solubilidad (Yuan et al., 2016).

Una desventaja que presenta este material es su incapacidad de disolverse en agua, en soluciones básicas o solventes orgánicos, la baja solubilidad a pH mayor de 7 se debe a que el grupo amino no se encuentra protonado en estos medios, por otro lado, efecto contrario sucede cuando se adiciona a algunos ácidos, como ácido clorhídrico, ácido fórmico, ácido láctico y principalmente en ácido acético. Como ya se mencionó la biodegradabilidad y actividad antimicrobiana hacen a este material ideal para la elaboración de películas utilizadas en la industria alimenticia y biomédica (Bakshi et al., 2020).

2.5.2 Estructura química

El quitosano es un biopolímero que está constituido por unidades repetitivas de β -(1-4)-2-acetamida-d-glucosa y β -(1-4)-2-amino-d-glucosa6. Es un glucosaminoglucano que se compone de dos azúcares comunes: glucosamina y N-acetilglucosamina dependiendo del tratamiento alcalino al que se sometió. Dentro de su estructura química, además de poseer carbono, hidrógeno y oxígeno como la mayoría de los polisacáridos posee grupos aminos, atribuyéndole características importantes para la formación de puentes de hidrógeno que los hacen atractivos para su uso comercial, debido a que presenta buenas propiedades antimicrobianas ya que inhibe el crecimiento de una variedad de bacterias, hongos y levaduras.

Este material posee tres grupos funcionales: grupos hidroxilos primarios, secundarios y grupos amino, mediante estos grupos se pueden realizar cambios en la estructura química que pueden modificar significativamente las propiedades físico-mecánicas y ampliar el rango de aplicaciones de este material. Algunas propiedades como la reactividad, la solubilidad, biodegradabilidad dependen de la protonación de los grupos amino.

El quitosano tiene una amplia variedad de aplicaciones en diferentes industrias como la alimenticia, textil, agricultura, medicina, tratamiento de aguas residuales, cosméticos, biosensores y en el área farmacéutica como en la liberación controlada de fármacos. Las aplicaciones más recientes del quitosano son en la administración de fármacos periodontales, gastrointestinales y bucales. Este biopolímero es ampliamente utilizado a diferencia de otros polímeros naturales gracias a sus grupos funcionales que facilitan su manipulación y manejo (Espinosa-Cavazos *et al.*, 2020).

2.5.3 Agentes entrecruzantes

Los agentes entrecruzantes son compuestos multifuncionales que forman enlaces entre cadenas poliméricas, creando redes poliméricas interconectadas. Existen redes interpenetradas (IPNs), donde dos polímeros se mezclan sin enlaces

covalentes, y semi-IPNs, en las que uno de los polímeros permanece en forma de cadenas lineales (Soto & Oliva, 2012).

El grado de entrecruzamiento depende de la cantidad de agente entrecruzante incorporado. Este proceso reduce la movilidad del polímero y genera una red tridimensional estable. Los agentes más comunes para modificar el quitosano en la adsorción de colorantes incluyen glutaraldehído (GLA), epiclorhidrina (ECH), etilenglicol diglicidil éter (EDGE) y tripolifosfato (TPP) (Vakili et al., 2014).

2.5.4 Etilenglicol diglicidil éter (EDGE)

El etilenglicol diglicidil éter (EDGE) que se presenta en la figura 1.7, es un agente reticulante para polímeros con grupos amina, carboxilo e hidroxilo. Contiene dos grupos epoxi altamente reactivos debido a la tensión de su anillo de tres miembros (Vakili et al., 2014). Durante el entrecruzamiento, el anillo epóxico se abre y reacciona con los grupos funcionales del quitosano, proceso que puede ocurrir en medios ácidos o básicos (Vargas et al., 2008).

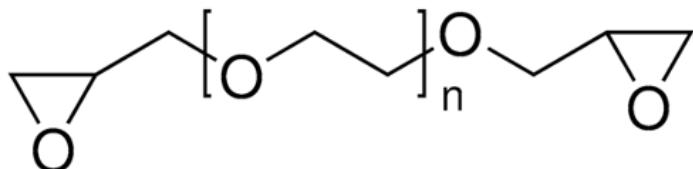


Figura 2.6 Etilenglicol diglicidil éter (Ayala-Gutiérrez et al., 2023).

2.6 Técnicas de caracterización

El análisis por **FTIR**, el **porcentaje de humedad** y el **análisis BET** constituyen técnicas fundamentales de caracterización empleadas en este trabajo para identificar las propiedades químicas, físicas y texturales de las películas a base de quitosano; además, se incorporan otras metodologías complementarias ampliamente utilizadas para caracterizar materiales adsorbentes; el **análisis**

termogravimétrico (TGA), que permite determinar la estabilidad térmica y los patrones de degradación del biopolímero; la **calorimetría diferencial de barrido (DSC)**, empleada para identificar transiciones térmicas como T_g y T_m; el **punto de carga cero (pHpzc)**, esencial para comprender la naturaleza superficial y el comportamiento ácido-base del material; y la **determinación del pKa de los colorantes**, que permite predecir su estado de ionización según el pH del medio. En conjunto, estas técnicas proporcionan una visión integral de la estructura, estabilidad, comportamiento superficial y capacidad de interacción del quitosano, reforzando la interpretación de los procesos de adsorción evaluados en el estudio.

2.6.1 Análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una metodología ampliamente utilizada en la industria y en laboratorios académicos para analizar la estructura de moléculas individuales y la composición de mezclas. Esta técnica emplea radiación del infrarrojo medio, que corresponde aproximadamente al rango de 4000 a 400 cm⁻¹ del espectro electromagnético, modulada para interactuar con la muestra. La luz infrarroja se absorbe a frecuencias específicas relacionadas con las energías de vibración de los enlaces interatómicos; cuando la energía vibracional de un enlace coincide con la energía de la radiación incidente, dicho enlace absorbe la luz. Como cada tipo de enlace vibra a diferentes frecuencias, absorbe distintas longitudes de onda del infrarrojo, generando un patrón característico. La posición e intensidad de estas bandas de absorción conforman un espectro único para cada molécula. En muchos análisis se emplea el accesorio ATR (Reflectancia Total Atenuada), que consiste en un cristal de alto índice de refracción donde la radiación infrarroja entra en contacto superficial con la muestra mediante una onda evanescente, permitiendo obtener espectros sin preparación previa, incluso en sólidos, polvos o películas (Walker, 2023).

2.6.2 Porcentaje de humedad

La capacidad de retener humedad o admisión de agua es una variable física definida formalmente como la cantidad de agua absorbida en un sólido en base a su afinidad

hidrofílica, determinada por los grupos funcionales presentes en la molécula, tal como los grupos -OH.

Consiste en medir la masa del sólido a prueba en una balanza, y someterlo a un proceso de secado, ya sea por desecador o calentarlo en un horno cerrado. Se saca el sólido, se le mide otra vez la masa en la balanza, se resta esa medida a la inicial para deducir la masa de agua desprendida, y se calcula la humedad que corresponda.

$$\% \text{Humedad} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2. 14}$$

Donde m_{inicial} y m_{final} son la masa inicial y la final del sólido, respectivamente, (en gramos). Como se advierte, es una medición lenta. No puede usarse cuando el sólido tiene otros compuestos evaporables, además de agua, o puede sufrir reacciones químicas debidas a la temperatura (García-González, 2021).

2.6.3 Análisis superficial por fisisorción de N₂

La ecuación de Brunauer, Emmett y Teller, (BET) permite determinar la superficie de un sólido basándose en la adsorción de un gas inerte, generalmente N₂, a baja temperatura.

Los métodos de determinación de tamaño de partícula por medio de laser se basan en el hecho de que las partículas en suspensión -líquida o gaseosa- difractan la luz, y el ángulo de esta difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula (Vargas et al., 2008).

2.6.4 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) mide la variación de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo, generando un termograma. El análisis térmico diferencial (DTA) compara la temperatura de una sustancia con un material de referencia bajo un programa térmico controlado.

La temperatura de transición vítrea (T_g) es el punto donde los polímeros amorfos pasan de un estado vítreo a uno flexible. Los procesos térmicos pueden ser exotérmicos (liberan calor, como cristalización y adsorción) o endotérmicos (absorben calor, como fusión, vaporización y sublimación). Las reacciones químicas pueden presentar ambos comportamientos según el proceso involucrado.

2.6.5 Calorimetría diferencial de barrido

La calorimetría de barrido diferencial (DSC) mide la diferencia en el flujo de calor entre una muestra y una referencia mientras la temperatura aumenta o se mantiene constante. A diferencia del análisis térmico diferencial (DTA), que registra diferencias de temperatura, la DSC es un método cuantitativo que mide cambios de energía. Ambas técnicas siguen programas térmicos similares, pero en la DSC, el calor fluye hacia la muestra y la referencia a través de un disco termoeléctrico calentado eléctricamente.

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), es una técnica que analiza el cambio de la capacidad calórica de un material (C_p) con la temperatura. Una muestra de masa conocida es calentada o enfriada y los cambios en su capacidad calórica se siguen como cambios en el flujo de calor. Estos cambios en el flujo de calor se comparan con los cambios presentados con la muestra a analizar, por lo que los datos se obtienen como entradas diferenciales de calor en función de la temperatura. La capacidad calorífica y del contenido de calor de un material (entalpía) se utiliza para estimar la eficiencia del proceso. Prácticamente todos los materiales pueden analizarse con DSC.

2.6.6 Determinación del pK_a

El pH afecta la adsorción de ácidos y bases débiles porque determina la fracción de sus formas neutras o ionizadas. Las formas neutras suelen adsorberse mejor, mientras que las cargadas presentan menor afinidad debido a su mayor solubilidad y posibles repulsiones con la superficie del adsorbente (Worch, 2012). La relación

entre pH y pKa define en qué rango coexisten ambas especies, siendo relevante cuando el pH se encuentra en el intervalo $pKa \pm 2$.

El pKa puede determinarse mediante espectrofotometría UV-Vis siempre que el compuesto posea un cromóforo cercano al sitio de ionización. Las formas protonada y desprotonada presentan espectros diferentes, excepto en el punto isosbético. El método de doble longitud de onda, introducido por Holmes y Snyder (1925) y mejorado por Flexser *et al.* (1935), permite obtener curvas sigmoides de absorbancia vs. pH, cuyo punto de inflexión corresponde al pKa. Este enfoque ha demostrado ser preciso, rápido y ampliamente utilizado en estudios modernos (Reijenga *et al.*, 2013; García-González, 2021).

3 MÉTODO

La figura 3.1 presenta el diagrama general del procedimiento seguido para evaluar la capacidad de adsorción de colorantes catiónicos y aniónicos en películas elaboradas a base de quitosano.

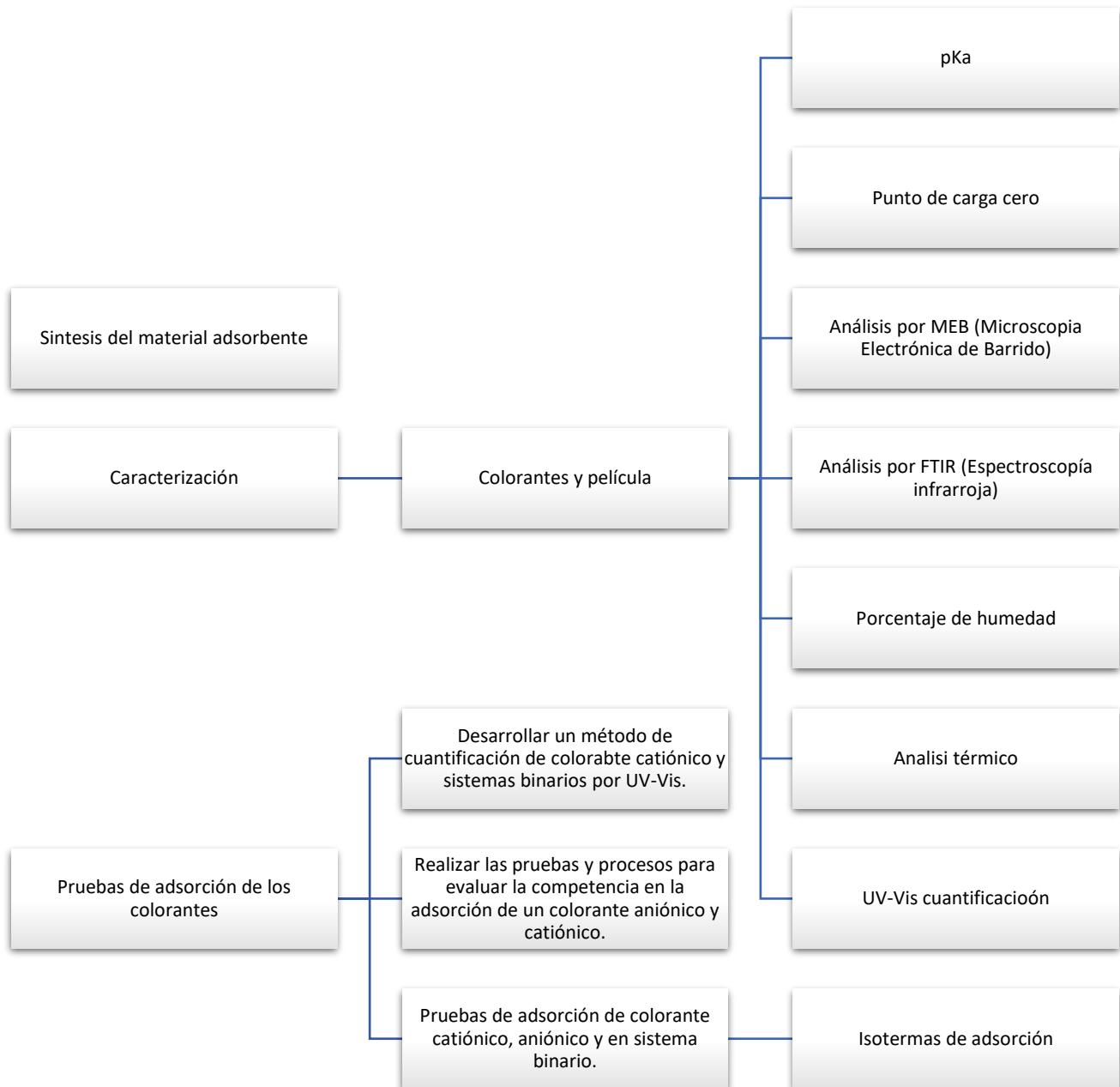


Figura 3.1 Diagrama general del proceso de evaluación de la capacidad de adsorción de colorantes catiónicos en películas a base de quitosano.

3.1 Síntesis de las películas a base de quitosano.

Se llevó a cabo la síntesis y caracterización de películas a base de quitosano mediante técnicas analíticas pertinentes, con el objetivo de evaluar su capacidad de adsorción frente a colorantes catiónicos y aniónicos. Para ello, se emplearon diversos reactivos de grado analítico y materiales de referencia, seleccionados por su compatibilidad con el sistema polimérico y su relevancia en estudios de adsorción.

Los colorantes utilizados fueron Amarillo 5 y Amarillo 57, ambos de origen sintético. Como electrolito se empleó cloruro de sodio (NaCl) cristal, marca J.T. Baker, lote V03C72, CAS No. 7647-14-5. El agente entrecruzante fue el etilenglicol diglicidil éter (EGDE), adquirido de Tokyo Chemical Industry Co., con número EC 218-746-2. El quitosano utilizado fue de grado industrial, proporcionado por Alimentos América, lote K1202029, con un grado de desacetilación (GDA) de 84.54 % y un peso molecular promedio (PM) de 82,682.6 g/mol. También se empleó celulosa microgranular como soporte, marca Sigma-Aldrich, lote 069K0081. Para la preparación de soluciones se utilizó ácido acético glacial (marca Fermont, lote 215361), hidróxido de sodio (NaOH, marca Meyer) y ácido clorhídrico (HCl, marca J.T. Baker). Todas las soluciones se prepararon con agua destilada.

La síntesis de las películas se realizó mediante el método de evaporación del solvente, siguiendo el protocolo propuesto por Ayala-Gutiérrez (2023), con ligeras adaptaciones. Inicialmente, se preparó una solución de quitosano disolviendo 3.8 g del polímero en 100 mL de ácido acético 0.4 M. La mezcla se mantuvo bajo agitación moderada durante 2 horas para asegurar la completa disolución del biopolímero. Posteriormente, se añadió el entrecruzante EGDE en una proporción del 130 μ L por cada 20 mL de solución respecto a la masa de quitosano, y se continuó la agitación hasta lograr una dispersión homogénea.

La solución obtenida se vertió sobre una superficie horizontal nivelada, cuidando la relación volumen/área para controlar el espesor de la película. El sistema se colocó en una estufa de convección natural a 45 °C durante 24 horas, permitiendo la

evaporación del solvente y la formación de la película sólida. Una vez seca, la película fue retirada cuidadosamente del soporte y sumergida en una solución de NaOH 0.1 M para neutralizar residuos ácidos y favorecer la estabilización estructural. Finalmente, se lavó con agua desionizada hasta alcanzar un pH neutro, obteniendo así películas listas para su caracterización y evaluación en procesos de adsorción.

3.2 Caracterización de las películas.

La caracterización de las películas a base de quitosano se realizó mediante técnicas fisicoquímicas que permitieron evaluar sus propiedades estructurales, térmicas y superficiales, con el objetivo de correlacionar dichas características con su capacidad de adsorción.

3.2.1 Determinación del porcentaje de humedad

El contenido de humedad de las películas se determinó mediante el método gravimétrico, basado en la diferencia de masa antes y después del secado. Para ello, se pesaron muestras de 0.01 g, 0.10 g y 0.25 g de película, las cuales fueron colocadas en un desecador al vacío. Las muestras se pesaron diariamente hasta alcanzar un valor de masa constante, considerado como el peso del material seco. El porcentaje de humedad retenida se calculó utilizando la ecuación 2.14, donde m_{inicial} y m_{final} representan la masa inicial y final del sólido (en gramos), respectivamente.

3.2.2 Punto de carga cero (PCC)

El punto de carga cero se determinó mediante el método de adición de sales, siguiendo el protocolo descrito por García-González *et al.* (2021). Se colocaron por triplicado 0.25 g de película de quitosano en viales individuales, a los cuales se añadieron 20 mL de solución salina de NaCl a una concentración de 0.1 M. El pH de cada solución fue ajustado en un rango de 1 a 13 utilizando un potenciómetro marca Thermo SCIENTIFIC, registrando dicho valor como pH inicial. Las muestras fueron sometidas a agitación constante en un agitador magnético orbital (Heidolph Unimax 1010) durante 24 horas, a una temperatura de 30 °C y una velocidad de 200

rpm. Al finalizar el tiempo de contacto, se separó el sobrenadante y se midió el pH final. El punto de carga cero se obtuvo a partir de la gráfica de ΔpH ($pH_{final} - pH_{inicial}$) en función del pH inicial, identificando el valor en el cual ΔpH es igual a cero.

3.2.3 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Con el objetivo de analizar la morfología superficial de las películas a base de quitosano antes y después del proceso de adsorción de colorantes, se realizó un estudio mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). Esta técnica permitió observar las características estructurales del material, identificar posibles modificaciones en la superficie del adsorbente y evaluar la distribución de los colorantes adsorbidos.

Las muestras analizadas incluyeron películas de quitosano sin tratamiento (control) y películas expuestas a soluciones de colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57) en condiciones de equilibrio, seleccionadas con base en los resultados obtenidos en los apartados de isotermas (4.5) y cinéticas de adsorción (4.4). Para cada colorante, se seleccionaron películas tratadas a pH representativos (ácido, neutro y básico), con concentraciones iniciales correspondientes al punto de saturación observado en los ensayos de adsorción.

Previo al análisis, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y posteriormente recortadas en secciones representativas. Para mejorar la conductividad eléctrica y evitar acumulación de carga durante el análisis, las películas fueron recubiertas con una fina capa de oro mediante pulverización catódica (sputtering), utilizando un recubridor metálico de vacío.

El análisis morfológico se realizó en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM-IT300, operando en modo de alto vacío. Las imágenes se obtuvieron a diferentes aumentos (100x, 500x, 1000x y 5000x), con voltajes de aceleración entre 10 y 15 kV, dependiendo de la resolución requerida. Se registraron micrografías de cada muestra para comparar la textura superficial, la presencia de poros, grietas, acumulaciones de colorante y otros rasgos relevantes que pudieran estar asociados al mecanismo de adsorción.

Este análisis permitió complementar los estudios fisicoquímicos previos, aportando evidencia visual sobre la interacción entre los colorantes y la matriz polimérica del quitosano, así como posibles modificaciones inducidas por el pH y la concentración del adsorbato.

3.2.4 Análisis por espectroscopia infrarroja (FTIR)

La identificación de los grupos funcionales presentes en el quitosano, el entrecruzante EGDE y las películas sintetizadas se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los espectros se obtuvieron utilizando el equipo FT/IR-4X de la marca JASCO, en un rangopectral de 4000 a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y 16 barridos por segundo. Este análisis permitió identificar las bandas características asociadas a los enlaces funcionales presentes en la matriz polimérica, así como evidenciar posibles interacciones químicas entre el quitosano y el agente entrecruzante.

3.2.5 Análisis termogravimétrico (TGA)

Para llevar a cabo el estudio de la estabilidad térmica de las películas a base de quitosano, se empleó un equipo TGA 550 marca Discovery, en el cual, muestras de quitosano (1.128 mg) y película de quitosano (0.926 mg) fueron analizadas en un intervalo de temperatura de 10 a 600°C en atmósfera inerte de nitrógeno, utilizando una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

3.2.6 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La estabilidad térmica de las películas también fue evaluada mediante análisis termogravimétrico (TGA), utilizando el equipo TGA 550 marca Discovery. Se analizaron muestras de quitosano y de película de quitosano en un intervalo de temperatura de 10 °C a 600 °C, bajo atmósfera inerte de nitrógeno y con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Este estudio permitió identificar las etapas de degradación térmica del material, así como estimar su resistencia a la descomposición en función de la temperatura.

3.3 Pruebas preliminares de adsorción

En el siguiente apartado se muestran unas pruebas que se realizaron con el propósito de encontrar y establecer las condiciones óptimas para cuantificar los colorantes, así como las condiciones de adsorción adecuadas para desarrollar los estudios de adsorción.

3.3.1 Metodología para cuantificación de los colorantes

La cuantificación de los colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5 se realizó mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), aplicando la ley de Lambert-Beer, la cual establece que la absorbancia de una sustancia en solución es directamente proporcional a su concentración, siempre que se mantenga constante la longitud de onda y la trayectoria óptica. Esta técnica permitió establecer una relación cuantitativa entre la intensidad de absorción y la concentración de los colorantes en solución, lo que resultó fundamental para evaluar su remoción en los ensayos de adsorción.

Para determinar la longitud de onda óptima de análisis, se realizó un escaneo espectral en el intervalo de 200 a 700 nm, identificando el pico de máxima absorbancia para cada colorante. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Scientific, modelo GENESYS 10S. A partir de los espectros obtenidos, se seleccionaron las longitudes de onda características: 383 nm para el Amarillo 57 y 427 nm para el Amarillo 5, las cuales fueron utilizadas en la construcción de las curvas de calibración.

La preparación de las soluciones patrón consistió en disolver 1.0000 g de cada colorante en 1 litro de agua destilada. Considerando la pureza comercial de los compuestos, se ajustaron las concentraciones reales, respectivamente. A partir de estas soluciones madre, se realizaron diluciones sucesivas para obtener concentraciones en el rango de 10 a 150 mg/L, con incrementos de 20 mg/L. Para cada concentración, se registró el espectro de absorbancia y se identificó el valor correspondiente en la longitud de onda seleccionada, permitiendo establecer el rango lineal de respuesta y generar la curva de calibración para cada colorante.

a) Curva de calibración del colorante

La curva de calibración se construyó a partir de las mediciones de absorbancia realizadas en soluciones de concentración conocida, en el intervalo de 10 a 150 mg/L. Las lecturas se realizaron en las longitudes de onda previamente determinadas para cada colorante, registrando el valor de absorbancia correspondiente a cada punto. Los datos obtenidos permitieron establecer una relación lineal entre la concentración y la absorbancia, conforme a la ley de Lambert-Beer, lo que facilitó la posterior cuantificación de los colorantes en los ensayos de adsorción.

b) Método de cuantificación de color de sistema binario

Para la cuantificación simultánea de los colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5 en sistemas binarios, se desarrolló una metodología espectrofotométrica basada en la resolución de mezclas con solapamiento espectral. Esta técnica se adaptó del procedimiento propuesto por García-González (2021), tomando como referencia el enfoque descrito por Sadeghzadeh *et al.* (2020), el cual permite descomponer la señal espectral de una mezcla en sus componentes individuales mediante el uso de ecuaciones lineales simultáneas.

El método consistió en registrar las absorbancias de las mezclas binarias a dos longitudes de onda específicas (383 nm y 427 nm), correspondientes a los máximos de absorción de cada colorante. A partir de los coeficientes de absorción molar determinados experimentalmente para cada colorante en ambas longitudes de onda, se construyó un sistema de ecuaciones que permitió calcular la concentración individual de cada componente en la mezcla. Esta estrategia fue validada mediante soluciones patrón de composición conocida, asegurando la precisión del método en condiciones de interferencia espectral.

3.3.2 Cálculo de la difusividad de los colorantes

La estimación de la difusividad efectiva de los colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5 se realizó mediante la aplicación de la ecuación de Wilke-Chang, la cual permite calcular la difusividad de solutos en líquidos a partir de parámetros fisicoquímicos del sistema. Esta ecuación es ampliamente utilizada en sistemas diluidos y se expresa como:

$$D_{AB} = 1.173 \times 10^{-16} (\varphi M_B)^{1/2} \frac{T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde: D_{AB} es la difusividad del soluto A en el solvente B (m^2/s), φ es el factor de asociación del solvente, M_B es el peso molecular del solvente (g/mol), T es la temperatura absoluta (K), μ_B es la viscosidad del solvente ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), V_A es el volumen molar del soluto (m^3/kmol).

Para aplicar esta ecuación, se consideraron las propiedades del agua como solvente, incluyendo su viscosidad, peso molecular y factor de asociación. Asimismo, se estimaron el peso molecular y el volumen molar de cada colorante a partir de su estructura química, utilizando aproximaciones basadas en grupos funcionales. La temperatura de operación se fijó en condiciones experimentales controladas.

Una vez definidos los parámetros requeridos, se procedió a sustituirlos en la ecuación de Wilke-Chang para obtener la expresión algebraica correspondiente a cada colorante. Este procedimiento se aplicó de forma independiente para el Amarillo 57 y el Amarillo 5, permitiendo establecer una base teórica para el análisis de la difusión molecular en medio acuoso. Los valores obtenidos se utilizaron posteriormente como referencia para interpretar los fenómenos de transporte involucrados en los ensayos de adsorción.

3.3.3 Efecto de la agitación en la adsorción de colorantes

Con el objetivo de evaluar el efecto de la intensidad de agitación sobre la capacidad de adsorción de colorantes, se diseñó un conjunto de experimentos en los que se varió la velocidad de agitación (RPM) durante el proceso de contacto entre el

adsorbente y las soluciones de colorantes. Para ello, se prepararon soluciones acuosas de concentración inicial conocida de los colorantes Amarillo 5 (Y5), Rojo 2 (R2) y Azul 1 (B1), seleccionados por sus propiedades aniónicas y su relevancia en estudios de remoción por materiales poliméricos.

Las pruebas se realizaron por triplicado, utilizando viales individuales que contenían películas a base de quitosano como material adsorbente. Se emplearon masas equivalentes de adsorbente seco, en el rango de 120 a 150 mg por litro de solución de colorante, asegurando condiciones homogéneas entre los ensayos. El sistema se sometió a agitación controlada en un agitador orbital, variando la velocidad en los siguientes niveles: 50, 100, 150, 200, 225, 250 y 275 revoluciones por minuto (rpm). El tiempo de contacto se mantuvo constante en 24 horas, a una temperatura de 30 °C.

Al finalizar el periodo de agitación, se procedió a separar las películas de quitosano del medio líquido mediante decantación. Posteriormente, se cuantificó la concentración residual de colorante en el sobrenadante utilizando las metodologías espectrofotométricas previamente descritas para cada compuesto. Esta etapa permitió establecer la relación entre la velocidad de agitación y la eficiencia de adsorción, considerando que la agitación puede influir en la transferencia de masa y en el acceso del colorante a los sitios activos del adsorbente.

3.3.4 Determinación del pKa de colorantes

La determinación del valor de pKa de los colorantes Amarillo 5 y Amarillo 57 se realizó mediante un enfoque espectrofotométrico, complementado con estimaciones teóricas por software. Este parámetro es fundamental para comprender el comportamiento ácido-base de los adsorbatos en función del pH, así como su interacción con el material adsorbente.

El procedimiento experimental se basó en la metodología descrita por García-González (2021), la cual consiste en registrar espectros de absorbancia en el intervalo de 200 a 700 nm para soluciones de colorante preparadas en un rango de pH de 1 a 14. Las soluciones se ajustaron cuidadosamente con ácido clorhídrico

(HCl) y hidróxido de sodio (NaOH) para cubrir todo el espectro ácido-básico. Las mediciones se realizaron utilizando un espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 10S.

Para cada colorante, se analizaron los espectros obtenidos en función del pH, identificando las longitudes de onda donde se presentan variaciones significativas en la absorbancia. Estas variaciones se atribuyen a cambios en el estado de ionización del colorante, permitiendo construir gráficas de absorbancia vs. pH. A partir de dichas gráficas, se identificó el punto de inflexión correspondiente al valor de pKa, definido como el pH en el cual coexisten en proporciones equivalentes las formas protonadas y desprotonadas del adsorbato.

De forma complementaria, se realizó una estimación teórica del pKa utilizando el software ChemAxon, el cual permite calcular propiedades ácido-base a partir de la estructura molecular del compuesto. Esta herramienta se empleó para validar los resultados experimentales y proporcionar una referencia adicional sobre el comportamiento químico de los colorantes en solución acuosa.

3.3.5 Efecto de pH sobre la capacidad de adsorción

Con el propósito de evaluar la influencia del pH en la eficiencia de adsorción del colorante Amarillo 5 y amarillo 57, se diseñaron un conjunto de experimentos en los que se modificó el pH de la solución de adsorbato en un rango amplio, comprendido entre pH 1 y pH 14. Las soluciones se prepararon con una concentración inicial de 250 mg/L, manteniendo condiciones similares a las utilizadas en los ensayos previos de cuantificación, con el fin de asegurar la comparabilidad de los resultados.

Las pruebas se realizaron por triplicado, empleando viales individuales que contenían películas a base de quitosano como material adsorbente. Se utilizaron masas equivalentes de adsorbente seco, en el rango de 240 a 300 mg por litro de solución, y se mantuvieron condiciones constantes de agitación (200 rpm), temperatura (30 °C) y tiempo de contacto (24 horas). El ajuste del pH se realizó mediante la adición controlada de soluciones de ácido clorhídrico (HCl) y de hidróxido de sodio (NaOH), verificando cada valor con un potenciómetro calibrado.

Una vez transcurrido el tiempo de contacto, se procedió a separar las películas del medio líquido. La concentración residual del colorante en el sobrenadante fue determinada mediante espectroscopía UV-Vis, utilizando las metodologías previamente descritas en el apartado 3.3.1. Esta etapa permitió establecer la relación entre el pH de la solución y la capacidad de adsorción del sistema, considerando que el estado de ionización del colorante y la carga superficial del adsorbente (ver apartado 3.2, punto de carga cero) pueden variar significativamente con el pH.

La información obtenida en este conjunto de pruebas se correlacionó directamente con los valores de pKa de los colorantes (apartado 3.3.4) y con el punto de carga cero del quitosano (apartado 3.2), lo que buscó interpretar los mecanismos de interacción electrostática involucrados en el proceso de adsorción. Esta correlación se analiza en profundidad en el capítulo de resultados y discusión.

3.4 Cinéticas de adsorción

3.4.1 Sistema un solo componente

La evaluación cinética del proceso de adsorción de los colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57) sobre películas a base de quitosano se realizó mediante un conjunto de ensayos diseñados para analizar la influencia del tiempo, pH y temperatura en la velocidad de adsorción. Las condiciones experimentales fueron seleccionadas con base en los resultados obtenidos en los apartados previos, particularmente en los estudios de pKa de los colorantes (apartado 3.3.4) y del punto de carga cero del adsorbente (apartado 3.2), con el fin de explorar escenarios representativos de interacción ácido-base.

Las soluciones de los colorantes se prepararon disolviendo las cantidades requeridas de AM5 y AM57 en agua destilada, obteniendo concentraciones iniciales de 250 mg/L y 174 mg/L, respectivamente. El pH de cada solución se ajustó mediante la adición de HCl (0.1 M) y NaOH (0.1 M), estableciendo dos condiciones por colorante: pH 2.5 y 7.0 para AM5, y pH 7.0 y 12.5 para AM57. Estas condiciones

permitieron evaluar el efecto del pH sobre la cinética de adsorción, considerando los estados de ionización del adsorbato y la carga superficial del adsorbente.

Cada ensayo cinético se realizó colocando 240 mg de película seca de quitosano en contacto con 10 mL de solución de colorante en viales herméticos. Los sistemas se mantuvieron bajo agitación constante a 200 rpm en un agitador orbital, a tres temperaturas de operación: 10 °C, 30 °C y 50 °C, con el propósito de analizar el efecto térmico sobre la velocidad de adsorción.

Las muestras se recolectaron en intervalos de tiempo definidos: 2, 4, 6, 8, 16, 24, 32, 48, 64 y 72 horas. En cada punto de muestreo se detuvo la agitación, y las soluciones fueron decantadas para separar el sobrenadante del adsorbente. La concentración residual de colorante en cada muestra se determinó mediante espectrofotometría UV-Visible, mediante la metodología UV-Vis establecido en el apartado 3.3.1.

Los datos obtenidos se ajustaron a los modelos cinéticos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y Elovich (ecuaciones 1.2 a 1.4), con el objetivo de identificar el mecanismo predominante de adsorción y estimar las constantes cinéticas asociadas. El ajuste de los modelos se realizó mediante regresión no lineal utilizando el software OriginPro 2016, aplicando un procedimiento iterativo hasta alcanzar la mejor correlación entre los datos experimentales y los valores calculados por cada modelo.

3.5 Isotermas de adsorción

3.5.1 Sistema un solo componente

La determinación de las isothermas de adsorción se llevó a cabo con el objetivo de estimar la capacidad máxima de adsorción de las películas a base de quitosano y describir el comportamiento del sistema en equilibrio frente a diferentes concentraciones iniciales de los colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57). Asimismo, se evaluó el efecto del pH sobre el equilibrio de adsorción, considerando los valores previamente seleccionados con base en los estudios de pKa de los colorantes (apartado 3.3.4) y del punto de carga cero del adsorbente (apartado 3.2).

Los ensayos se realizaron a una temperatura constante de 30 °C y un tiempo de contacto de 48 horas, condiciones determinadas a partir de los resultados cinéticos obtenidos en el apartado 3.4. Para cada prueba, se colocaron 10 mL de solución de colorante en viales individuales, junto con la masa correspondiente de película de quitosano, manteniendo una relación adsorbente/solución en el rango de 240 a 300 mg/L. Los sistemas se mantuvieron bajo agitación constante a 200 rpm para asegurar condiciones homogéneas durante el proceso.

En el caso del colorante AM57, los experimentos se realizaron a pH 7.0 y 12.5, utilizando concentraciones iniciales de 74, 124, 174, 224, 274, 324 y 374 mg/L. Para el colorante AM5, los ensayos se llevaron a cabo a pH 2.5 y 7.0, con concentraciones iniciales de 150, 200, 250, 300 y 350 mg/L. Una vez alcanzado el equilibrio, las películas se separaron de la solución de colorante, y la concentración residual de colorante en el sobrenadante se determinó mediante espectrofotometría UV-Visible, utilizando las longitudes de onda características y las curvas de calibración previamente establecidas (apartado 3.3.1).

Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados a los modelos de isoterma de Langmuir, Freundlich y Sips, con el propósito de describir la naturaleza del proceso de adsorción y estimar parámetros como la capacidad máxima de adsorción, la constante de afinidad y la heterogeneidad del sistema. Los ajustes y análisis estadísticos se realizaron mediante regresión no lineal utilizando el software OriginPro 2016.

3.5.2 Sistema binario

Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de adsorción en sistemas binarios compuestos por mezclas equimolares de los colorantes AM5 y AM57, con el fin de analizar la competencia entre adsorbatos por los sitios activos del material. Estos ensayos se realizaron a pH 7.0, condición seleccionada por encontrarse próxima al punto de carga cero del quitosano y representar un entorno neutro donde ambos colorantes presentan estados de ionización relevantes para la interacción electrostática.

Las soluciones binarias se prepararon a partir de diluciones equimolares de AM5 y AM57, manteniendo concentraciones totales de 50, 100, 150, 200, 250 y 300 mg/L. Para cada ensayo, se colocaron 10 mL de solución binaria en viales individuales, junto con la masa correspondiente de película de quitosano, manteniendo la misma relación adsorbente/solución utilizada en los sistemas individuales. Los sistemas se agitaron a 200 rpm durante 48 horas a 30 °C.

Una vez alcanzado el equilibrio, las muestras fueron centrifugadas y filtradas para separar el sobrenadante. La cuantificación individual de cada colorante en la mezcla se realizó mediante el método espectrofotométrico binario desarrollado en el apartado 3.3.1.2, el cual permite descomponer la señal de absorbancia en sus componentes individuales mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales a partir de las absorbancias registradas a 383 nm y 427 nm.

Los datos obtenidos se utilizaron para construir curvas de adsorción individual en presencia del otro colorante, y se ajustaron a los modelos de isoterma de Langmuir extendido y Freundlich competitivo, con el fin de evaluar la influencia de la competencia por los sitios activos y estimar los parámetros de afinidad relativa y capacidad máxima en condiciones multicomponente. Los ajustes se realizaron mediante regresión no lineal utilizando el software OriginPro 2016.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Síntesis de películas a base de quitosano

Se obtuvieron películas a base de quitosano (figura 4.1), las cuales, tras un análisis visual preliminar, presentaron un color amarillento característico, estructura física estable y resistencia a la agitación en medio acuoso. Además, mostraron una apariencia homogénea, superficie lisa, consistencia sólida y cierta flexibilidad. Estas propiedades físicas sugirieron que las películas son adecuadas para su uso en los experimentos posteriores de adsorción.

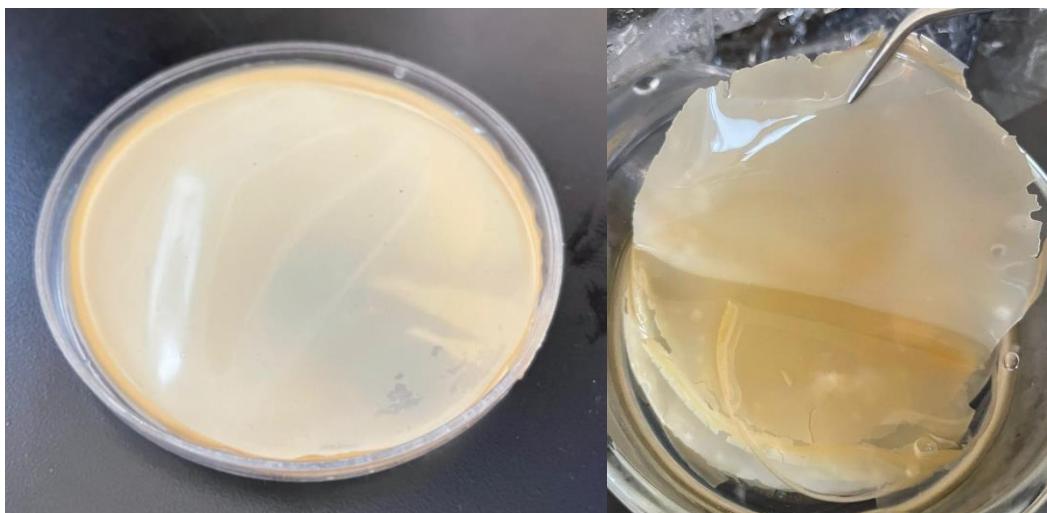


Figura 4.1 Película a base de quitosano (Seca a la izquierda y humedad a la derecha).

4.2 Caracterización de las películas

4.2.1 Determinación de porcentaje de humedad

El contenido de humedad de las películas a base de quitosano se determinó mediante el método gravimétrico, calculando la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de las muestras. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1, donde se observa que el porcentaje de humedad varía entre 68.29 % y 71.27 %, con un valor promedio de 69.69 %.

Tabla 4.1 Porcentaje de humedad de películas a base de quitosano.

<i>Peso húmedo</i>	<i>Peso seco</i>	<i>% de Humedad</i>
0.0082 g	0.0026 g	68.29
0.0128 g	0.0039 g	69.53
0.0181 g	0.0052 g	71.27

Este valor promedio es consistente con los resultados reportados por Ayala-Gutiérrez (2023), lo cual se atribuye a la aplicación de una metodología de síntesis similar. La humedad retenida en las películas es un parámetro relevante, ya que influye en su comportamiento mecánico, estabilidad estructural y capacidad de interacción con los colorantes durante los procesos de adsorción.

4.2.2 Punto de carga cero (PCC)

a) Película a base de quitosano

La caracterización del punto de carga cero (PCC) de las películas a base de quitosano se realizó en un intervalo de pH de 1 a 13, con el propósito de identificar el valor en el cual la carga superficial del material es nula. Este parámetro permite inferir el comportamiento electrostático del adsorbente bajo distintas condiciones experimentales, especialmente en los ensayos de adsorción.

Como se observa en la Figura 4.2, el PCC de la película de quitosano se encuentra aproximadamente en pH 7.2. En medios ácidos, el quitosano presenta una carga superficial predominantemente positiva, atribuida a la protonación de los grupos amino ($-\text{NH}_2 \rightarrow -\text{NH}_3^+$), lo que favorece la interacción con especies aniónicas. Por encima del PCC, la carga superficial se vuelve negativa, lo que modifica la afinidad del material hacia colorantes catiónicos.

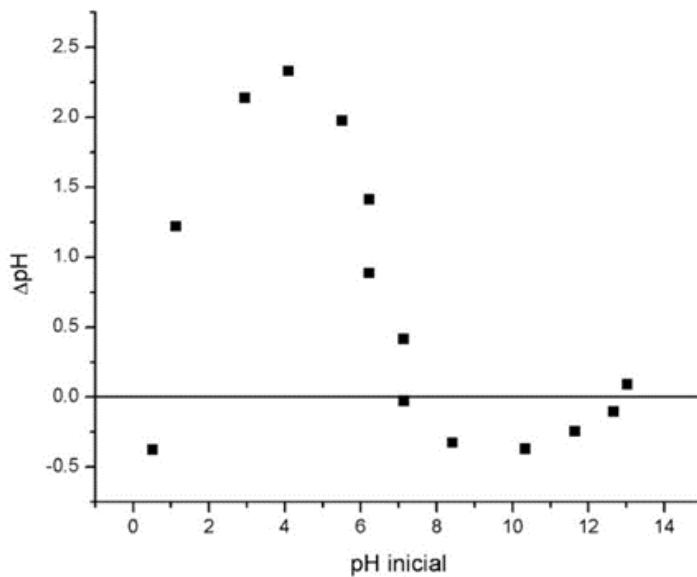


Figura 4.2 Punto de carga cero para la película a base de Quitosano.

b) Colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5

En el caso del colorante Amarillo 57, se observó un comportamiento complejo, con transiciones cercanas a la neutralidad en los rangos de pH 1–2 y alrededor de pH 10. Como se muestra en la figura 4.3, el valor estimado de PCC es de aproximadamente pH 0.61, aunque se identificó un comportamiento cercano a la neutralidad también en pH 9.7, lo que sugiere la presencia de múltiples especies ionizables en la estructura del colorante.

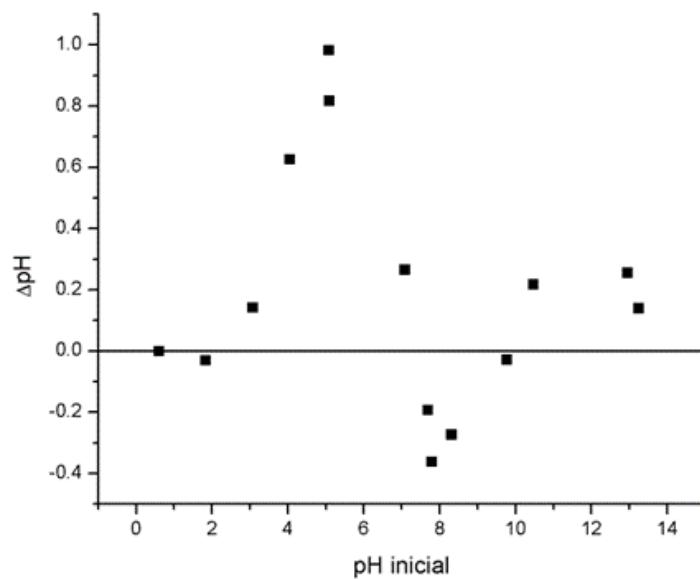


Figura 4.3 Punto de carga cero para el colorante amarillo 57.

Para el colorante Amarillo 5, se identificó un PCC claro en pH 7.7, como se muestra en la figura 4.4. Este valor indica que el colorante se comporta como una especie aniónica por debajo de dicho pH y como catiónica por encima, lo cual es relevante para interpretar su interacción con el quitosano en función del pH del medio.

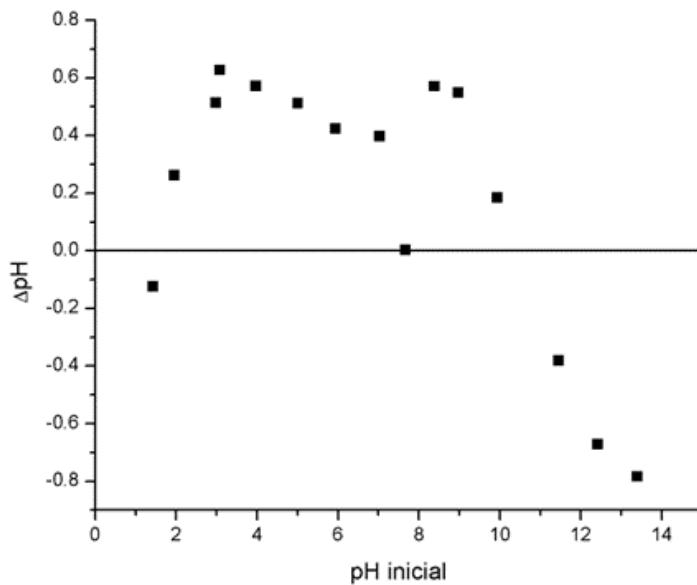


Figura 4.4 Punto de carga cero para el colorante amarillo 5

De acuerdo con la teoría de superficies cargadas, los materiales se encuentran cargados negativamente por debajo de su PCC y positivamente por encima. En este estudio, se determinaron los siguientes valores aproximados de PCC: 7.2 para la película de quitosano, 0.61 para el Amarillo 57 y 7.7 para el Amarillo 5. Estos resultados permiten establecer criterios de compatibilidad electrostática entre adsorbente y adsorbato, fundamentales para el diseño de condiciones óptimas en los procesos de adsorción.

4.2.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El análisis morfológico de las películas a base de quitosano se realizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), utilizando el equipo FE-SEM JSM-7610F. Las muestras fueron previamente recubiertas con una aleación de oro/paladio (Au/Pd) en un sistema Denton Vacuum Desk V, empleando argón como gas de arrastre, con el fin de mejorar la conductividad eléctrica y evitar acumulación de carga durante el análisis. Se obtuvieron micrografías a diferentes aumentos para comparar la superficie de las películas antes y después del proceso de adsorción de los colorantes AM57 y AM5.

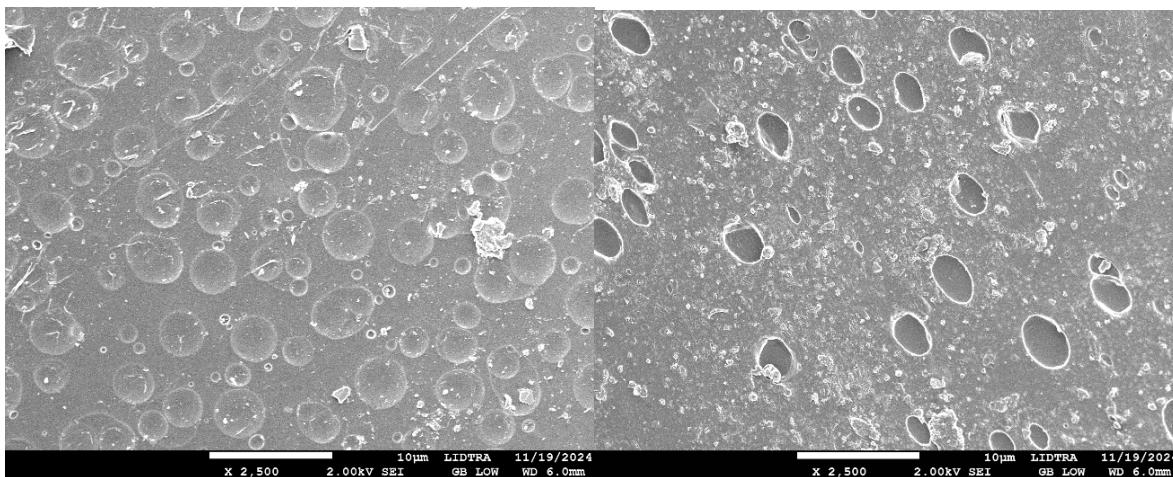


Figura 4.5 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 57 (derecha) a 2500x.

De la figura 4.5 a un aumento de 2500x, se observa que la película de quitosano presenta una superficie porosa con cavidades cóncavas distribuidas de forma uniforme, aunque con diámetros variables. Estas cavidades no parecen ser profundas y la superficie muestra rigidez, posiblemente atribuida al efecto del entrecruzante. También se identifican partículas amorfas distribuidas aleatoriamente. Tras el proceso de adsorción con Amarillo 57, la superficie se modifica: se reduce la cantidad de poros visibles y se incrementa la rugosidad superficial.

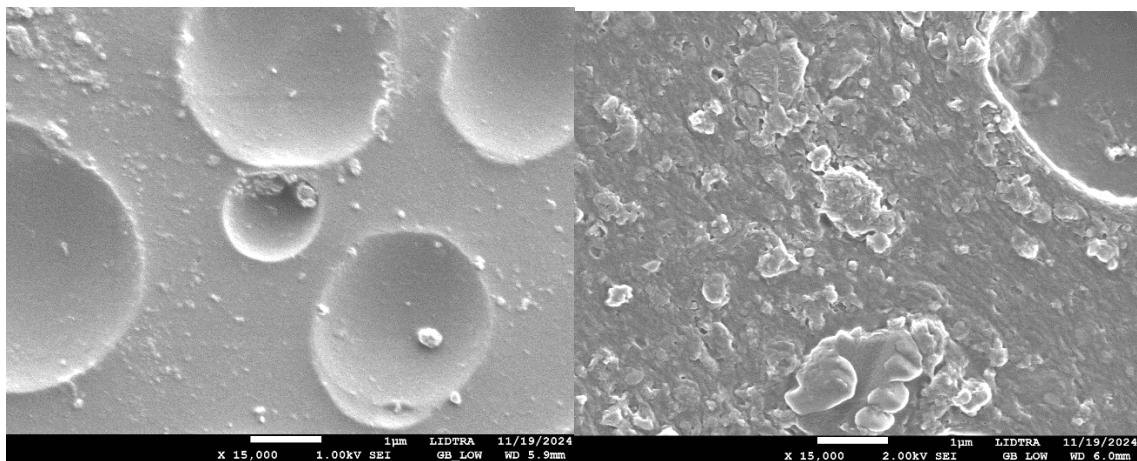


Figura 4.6 Micrografías que muestran la comparación de la película a base de quitosano (izquierda) con la película después del proceso de adsorción con colorante amarillo 57(derecha) a un aumento de 15000X.

En la figura 4.6 a 15000x, la película sin tratamiento muestra una superficie lisa con partículas amorfas de tamaño variable distribuidas aleatoriamente. Las cavidades cóncavas son superficiales. Luego de la adsorción, la superficie aparece recubierta por aglomerados que generan una textura rugosa. Se observan cavidades parcial o totalmente llenas, lo que indica una interacción entre el colorante y la matriz polimérica.

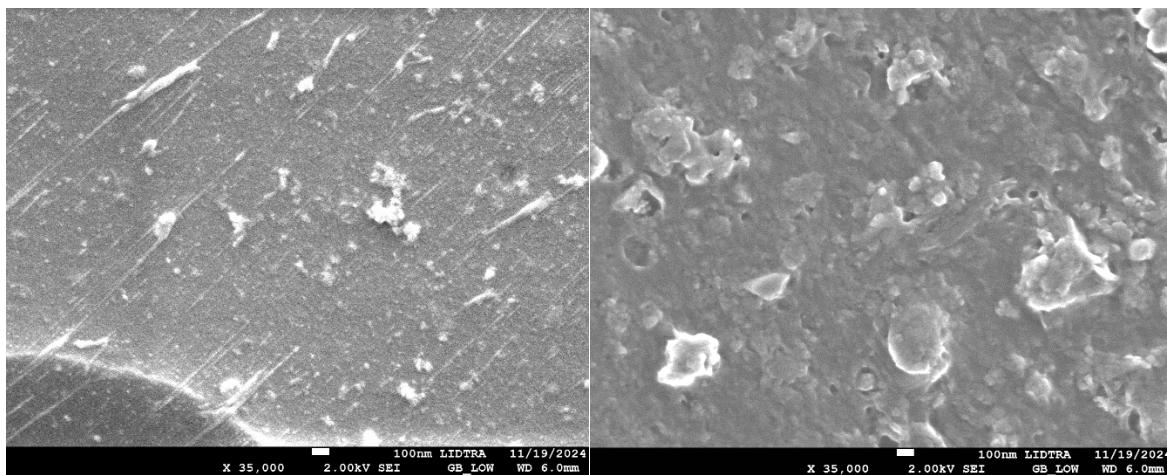


Figura 4.7 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 57 (derecha) a 35000x.

En la figura 4.7 a mayor aumento (35000x), se confirma que la superficie de la película no es completamente lisa y presenta partículas amorfas. Tras el contacto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

con el colorante, se observa una cobertura uniforme de la superficie por glóbulos amorfos de distintos tamaños, lo que sugiere una adsorción del Amarillo 57 sobre la película de quitosano.

Película con colorante Amarillo 5

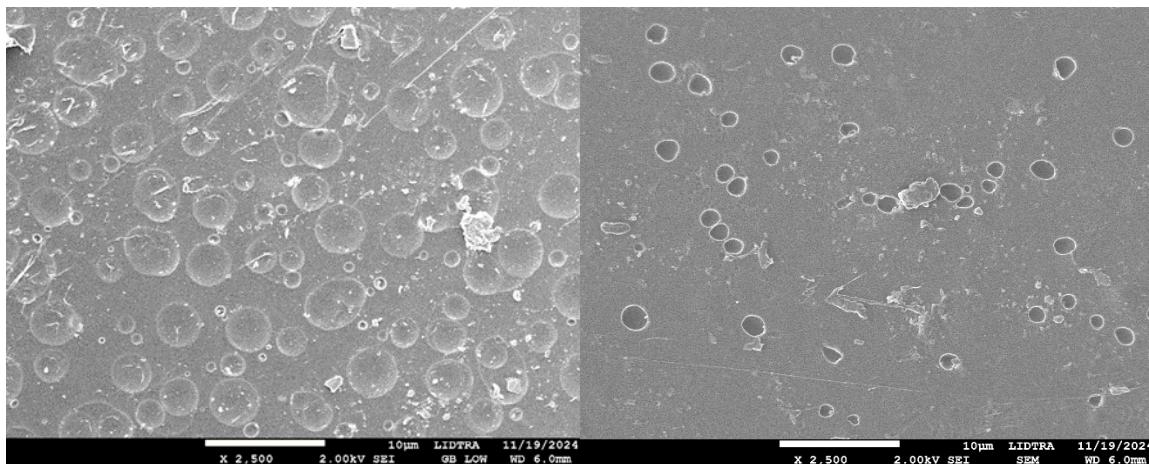


Figura 4.8 Comparación de la película a base de quitosano (derecha) y tras adsorción de Amarillo 5 (izquierda) a 2500x.

En la figura 4.8 a 2500x, se observa un comportamiento similar al registrado con el Amarillo 57. La superficie de la película aparece cubierta por el colorante, aunque algunas cavidades cóncavas permanecen parcialmente libres, lo que indica una adsorción heterogénea.

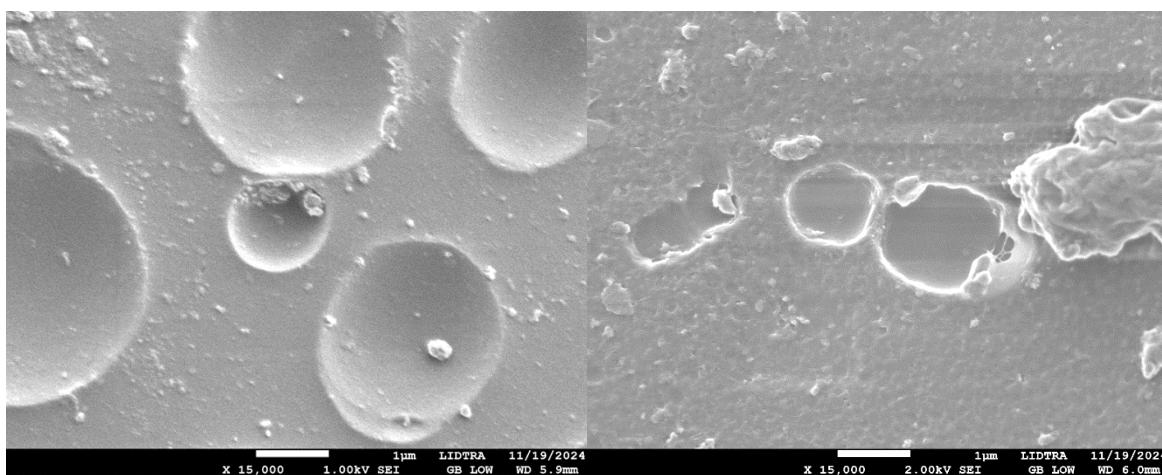


Figura 4.9 Comparación de la película a base de quitosano (izquierda) y tras adsorción de Amarillo 5 (derecha) a 15000x.

En la figura 4.9 a 15000x, se aprecia una modificación evidente en la superficie de la película tras la adsorción del Amarillo 5. Se forman glóbulos amorfos de distintos tamaños, y la rugosidad superficial aumenta. Algunas cavidades permanecen parcialmente abiertas, lo que sugiere una adsorción incompleta en ciertas zonas.

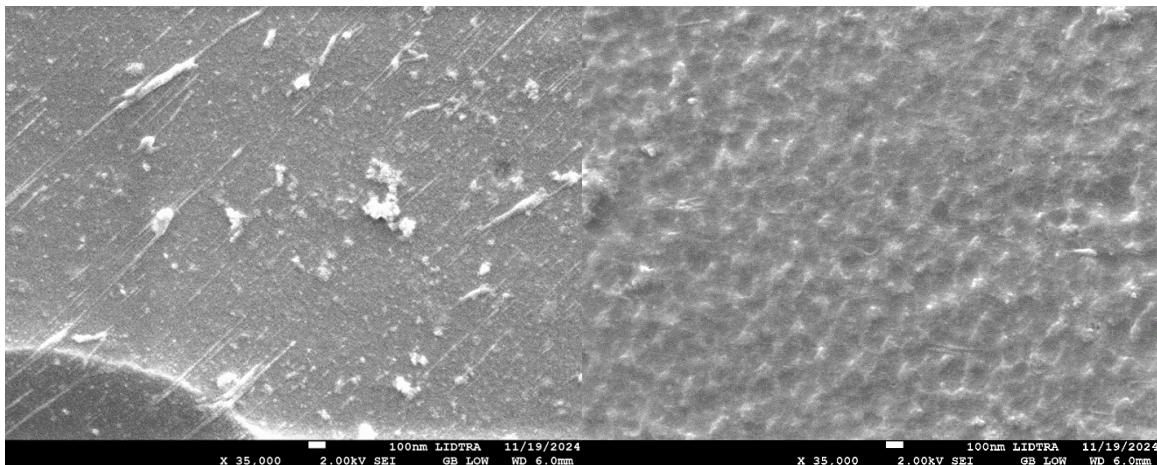


Figura 4.10 Comparación de la película a base de quitosano (derecha) y tras adsorción de Amarillo 5 (izquierda) a 35000x.

Finalmente en la figura 4.10, a 35000x, se observa una transformación completa de la superficie de la película tras la adsorción del Amarillo 5. La superficie se vuelve más uniforme y rugosa, desaparecen las cavidades cóncavas visibles, y se evidencia una cobertura total del colorante sobre la matriz polimérica, lo que confirma la fuerte interacción..

4.2.4 Análisis por espectroscopía infrarroja (FTIR)

Con el objetivo de confirmar la presencia de los grupos funcionales característicos del quitosano, del agente entrecruzante EGDE y del colorante Amarillo 57, así como de identificar posibles interacciones químicas entre ellos, se realizó un análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Este análisis permitió observar las bandas de absorción asociadas a las vibraciones moleculares de los enlaces funcionales presentes en cada componente y en la película sintetizada. Los espectros obtenidos fueron procesados y graficados mediante el software OriginPro 2016.

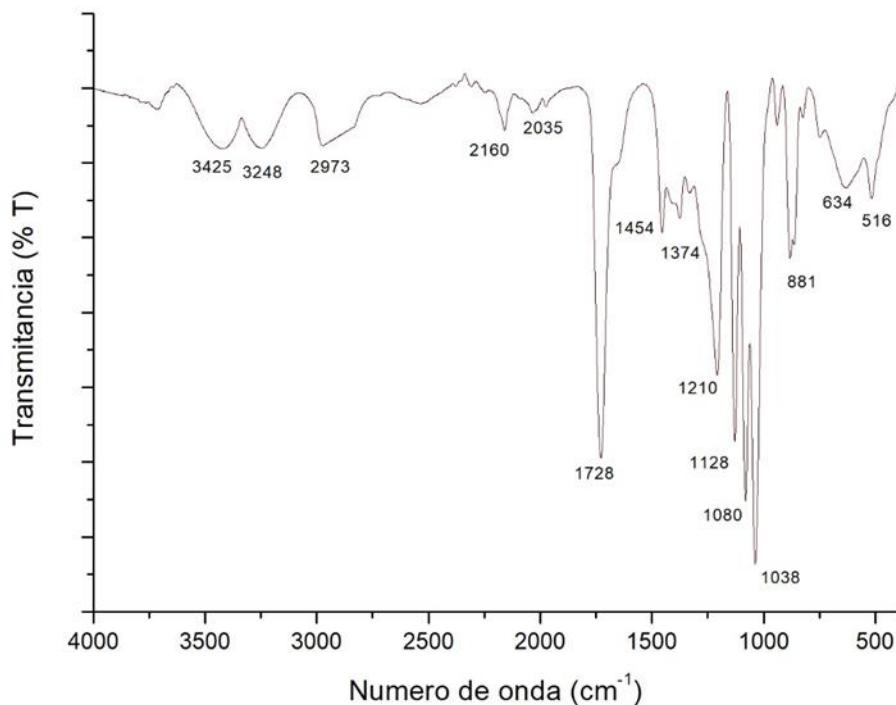


Figura 4.11 Espectro infrarrojo del EGDE.

En el espectro correspondiente al EGDE (figura 4.11), se identificó una banda intensa a 1728 cm^{-1} atribuida a la vibración de estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) de tipo éster. Asimismo, se observó una banda menos intensa a 1454 cm^{-1} correspondiente a la vibración de estiramiento del enlace $\text{C}=\text{C}$, y una banda a 2973 cm^{-1} asociada a la vibración de estiramiento del enlace $\text{C}-\text{H}$ del monómero. La banda ancha a 3248 cm^{-1} se asigna a la vibración de los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), en concordancia con lo reportado por Esquerdo *et al.* (2014).

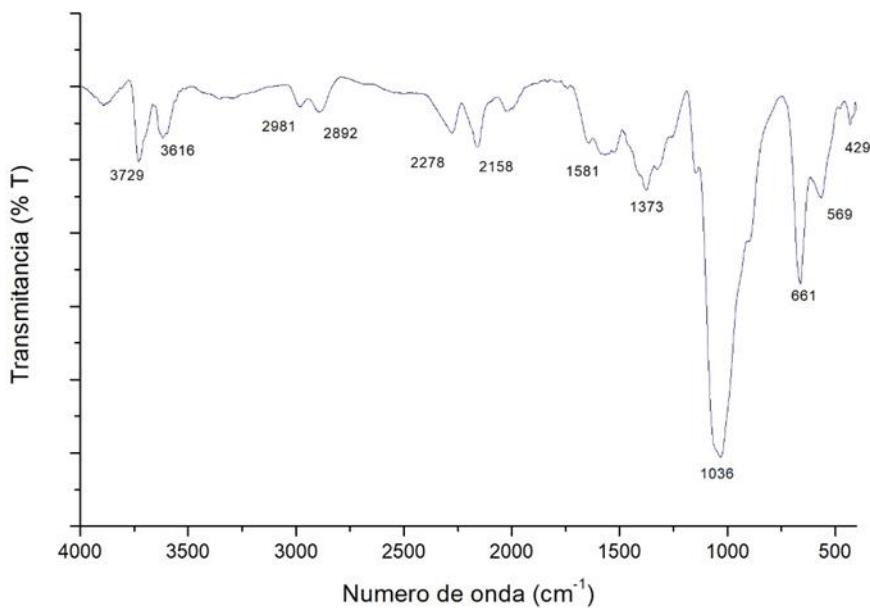


Figura 4.12 Espectro infrarrojo del quitosano.

El espectro del quitosano (figura 4.12) mostró una banda a 3729 cm^{-1} correspondiente a la vibración de estiramiento del grupo hidroxilo (O–H), y otra a 3616 cm^{-1} atribuida a la vibración de estiramiento del grupo amino (N–H) de una amina primaria. Las bandas a 2981 cm^{-1} y 2892 cm^{-1} se asignan a las vibraciones de estiramiento de los grupos metilideno (–CH) y metileno (–CH₂), respectivamente. A 1581 cm^{-1} se identificó una banda correspondiente tanto a la vibración de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) de una amida como a la flexión del grupo amino (N–H). Las bandas a 1373 cm^{-1} se asociaron a la flexión del grupo metileno y del hidroxilo, mientras que las señales a 1036 cm^{-1} y 1022 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C–O y C–N, respectivamente (García González *et al.*, 2016; Ngah *et al.*, 2010).

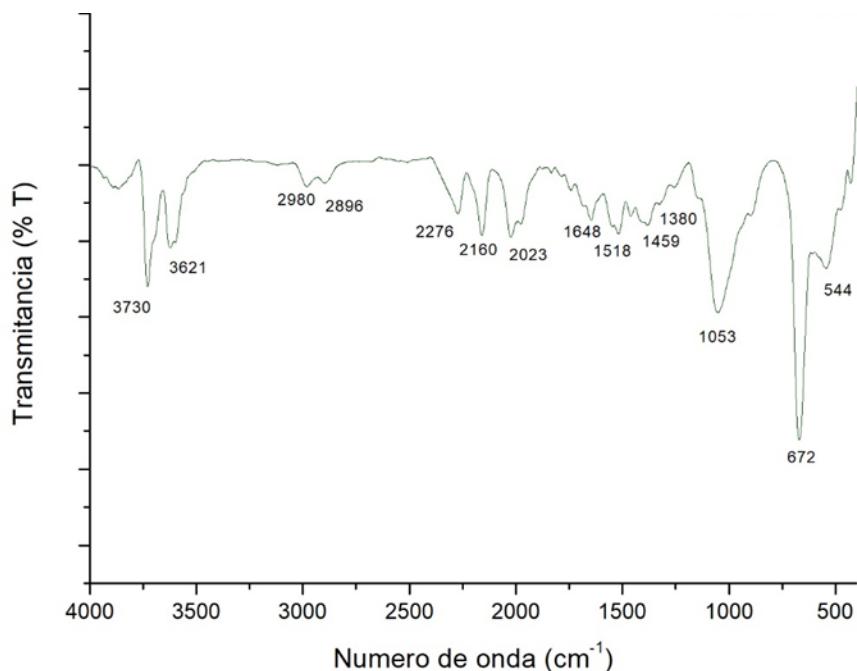


Figura 4.13 Espectro infrarrojo de la película a base de quitosano.

En el espectro de la película de quitosano entrecruzada con EGDE (figura 4.13), se conservaron las señales características del quitosano, observándose bandas a 3730 cm^{-1} y 3621 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento de los grupos $-\text{OH}$ y $-\text{NH}$. La banda a 1518 cm^{-1} se asocia a una vibración débil del enlace $\text{N}-\text{H}$, mientras que la banda a 1380 cm^{-1} corresponde a la flexión del grupo $-\text{OH}$. Se observó un incremento en la intensidad de las bandas a 3730 y 3621 cm^{-1} , lo cual sugiere una interacción entre los grupos hidroxilo del EGDE y los grupos funcionales del quitosano (García González *et al.*, 2016; Wan Ngah *et al.*, 2010).

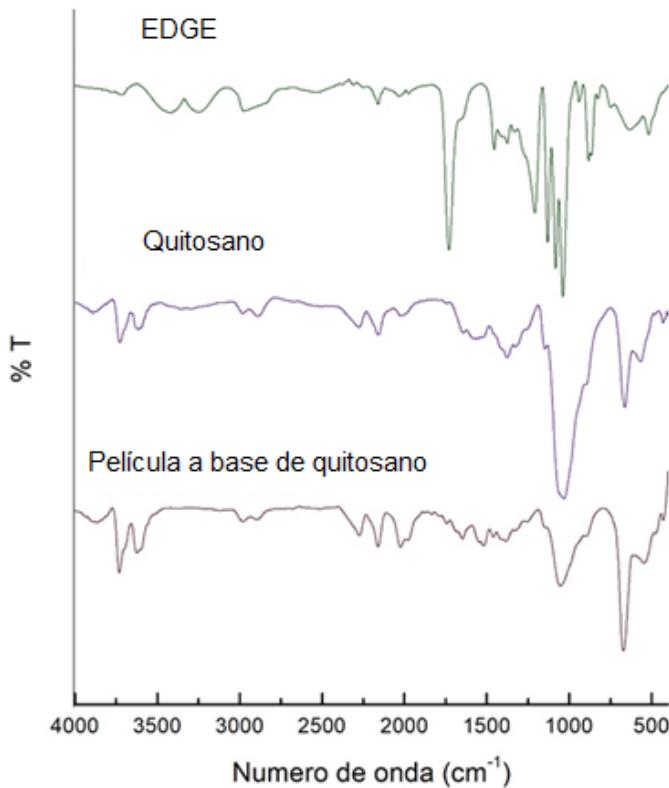


Figura 4.14 Espectros infrarrojo de EGDE, quitosano y película de quitosano.

El análisis conjunto de los espectros (figura 4.14) permitió identificar bandas comunes y nuevas señales atribuibles al entrecruzamiento. Se observó una banda a 3730 cm^{-1} correspondiente al grupo O–H (alcoholes secundarios), y otra a 3621 cm^{-1} asociada a la vibración de estiramiento del grupo N–H de una amida mono-sustituida (CON–HR). La banda a 2980 cm^{-1} se asigna a la vibración de estiramiento del grupo metileno ($-\text{CH}_2$), mientras que la señal a 1648 cm^{-1} corresponde al estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) de una amida ($\text{CO}-\text{NH}_2$). La banda a 1518 cm^{-1} se relaciona con la flexión del grupo amida mono-sustituida ($\text{CO}-\text{NH}$), y las bandas a 1363 y 1380 cm^{-1} con la flexión de los grupos $-\text{OH}$ y $-\text{CH}_2$, respectivamente. Finalmente, la banda a 1150 cm^{-1} se atribuye a la vibración de flexión del enlace C–O–C de ésteres alifáticos ($\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2$), característicos del EGDE, mientras que las bandas a 1053 cm^{-1} y 1022.73 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C–O y C–N, respectivamente (García-G. *et al.*, 2016; Wan Ngah *et al.*, 2010).

4.2.5 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) se empleó para evaluar la estabilidad térmica de los materiales utilizados en este estudio, específicamente el quitosano puro y las películas entrecruzadas con EGDE. Los termogramas obtenidos se presentan en las figuras 4.15 y 4.16.

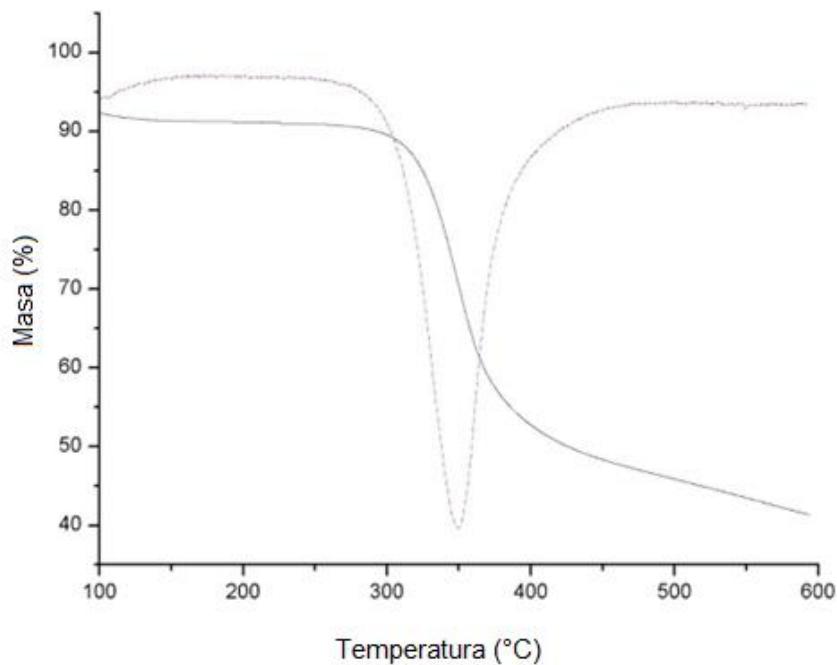


Figura 4.15 Termograma TGA del quitosano.

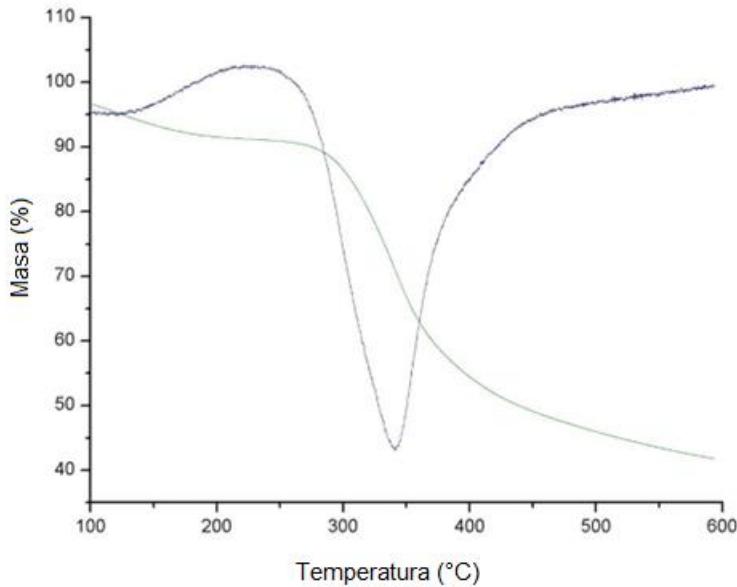


Figura 4.16 Termograma TGA de película de quitosano.

En el caso del quitosano (Figura 4.15), no se observó pérdida de masa significativa en el intervalo de 50 °C a 150 °C, lo cual se atribuye a que las muestras fueron previamente secadas. La principal etapa de degradación térmica se presentó entre 250 °C y 350 °C, correspondiente a la descomposición de la estructura polimérica del quitosano. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Salama *et al.* (2018), quienes identificaron dos etapas de descomposición, con una temperatura máxima de degradación cercana a los 238 °C.

Para la película entrecruzada con EGDE (Figura 4.16), se identificaron tres etapas de pérdida de masa. La primera se presentó entre 42 °C y 133 °C, con una pérdida aproximada del 8 %, atribuida a la evaporación de agua residual y solventes. La segunda etapa, correspondiente a la descomposición térmica del quitosano, se observó entre 133 °C y 360 °C, con una pérdida de masa del 41 %. Finalmente, se registró una tercera etapa de degradación leve entre 360 °C y 590 °C, con una pérdida adicional del 7 %. Al finalizar el análisis, se obtuvo un residuo sólido del 44 % a 600 °C.

La comparación entre ambos materiales indica que el comportamiento térmico del quitosano y de la película entrecruzada es similar, sin cambios significativos en las etapas de degradación. Esto sugiere que el proceso de entrecruzamiento con EGDE no altera de manera sustancial la estabilidad térmica del quitosano, lo cual es relevante para su aplicación en procesos que involucren temperaturas moderadas.

4.2.6 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis térmico de las muestras se llevó a cabo mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), con el objetivo de identificar las transiciones térmicas características del quitosano y de las películas entrecruzadas con EGDE. A partir de las curvas obtenidas, se determinaron la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de cristalización (T_c) y la temperatura de fusión (T_f), parámetros fundamentales para comprender el comportamiento térmico del material.

Cabe destacar que la determinación precisa de T_g y T_f en el quitosano mediante DSC presenta ciertas dificultades, debido a su alta afinidad por la humedad y a la rigidez de su cadena polimérica, compuesta por unidades de 2-amino-2-desoxi-D-glucopiranosa. Estas características reducen el cambio en la capacidad calorífica asociada a la transición vítrea, dificultando su detección (Bonilla *et al.*, 2013; Martel-Estrada *et al.*, 2010; Minfeng *et al.*, 2008; Sakurai *et al.*, 2000). No obstante, en la literatura se han reportado valores de T_g cercanos a 202 °C (Suyatma *et al.*, 2011) y 194 °C (Suyatma *et al.*, 2004).

En el presente estudio, el análisis DSC del quitosano mostró un primer pico endotérmico en el intervalo de 120–140 °C, atribuible a la eliminación de agua libre, especialmente en muestras con mayor contenido de humedad residual. Este comportamiento ha sido reportado previamente por Kittur *et al.* (2002). Posteriormente, se observó un segundo pico endotérmico alrededor de 250 °C, el cual podría estar relacionado con la desacetilación térmica del quitosano, como lo sugieren Almeida *et al.* (2010). Finalmente, se identificó un pico exotérmico cercano a 294 °C, asociado a la descomposición de las cadenas poliméricas, en concordancia con los valores reportados por los mismos autores.

En las figuras 4.17 y 4.18 se presentan los termogramas correspondientes al quitosano puro y a la película entrecruzada. En ambos casos, se observa una escala de temperatura de 0 °C a 400 °C. Para la película de quitosano, se identificó una temperatura de transición vítrea (T_g) en 150.3 °C, una temperatura de cristalización (T_c) endotérmica en 251.78 °C, y una temperatura de fusión (T_f) exotérmica en 294.64 °C. Estos valores indican que el entrecruzamiento con EGDE no altera significativamente las transiciones térmicas principales del quitosano, aunque puede influir en la intensidad y definición de los eventos térmicos observados.

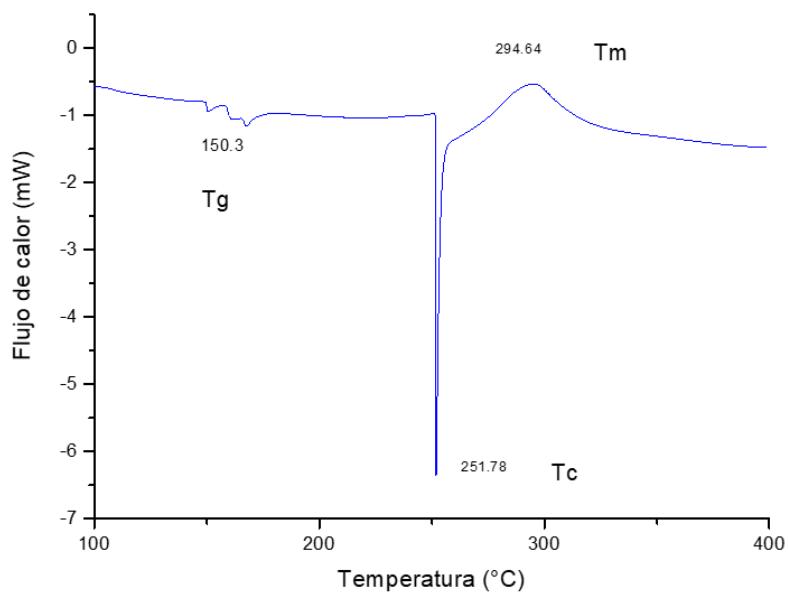


Figura 4.17 Transiciones térmicas del quitosano obtenidas por DSC.

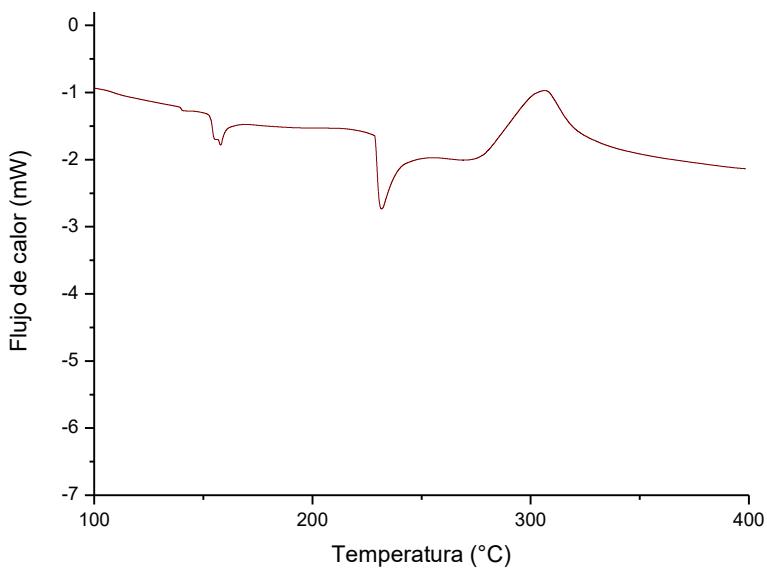


Figura 4.18 Transiciones térmicas de la película de quitosano entrecruzada obtenidas por DSC.

4.3 Pruebas preliminares de adsorción

Con el propósito de establecer las condiciones óptimas para los estudios posteriores de cinética, isoterma y ensayos en sistema batch, se realizaron pruebas preliminares de adsorción. Estas incluyeron la validación de la metodología espectrofotométrica para la cuantificación de los colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5, así como el cálculo de sus coeficientes de difusión en medio acuoso a distintas temperaturas.

4.3.1 Metodología para cuantificación del colorante

a) Amarillo 57

A partir de los barridos espectrales realizados en el rango de 200 a 700 nm (figura 4.19), se identificó que el pico máximo de absorbancia para el Amarillo 57 se localiza en 383 nm, valor que coincide con el rango reportado en su hoja de seguridad (≈ 384 nm). Los espectros obtenidos permitieron observar que, a concentraciones superiores a 70 mg/L, la señal se satura, lo que limita la precisión de la medición.

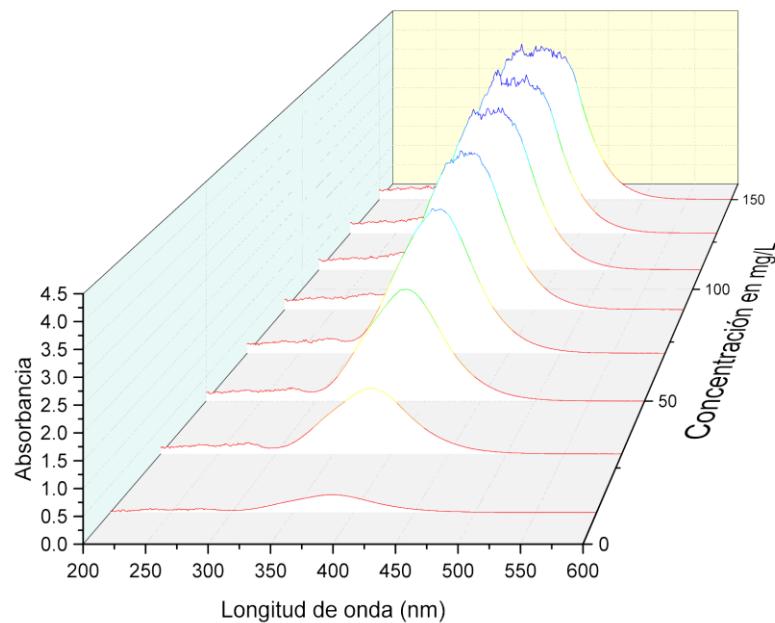


Figura 4.19 Barridos de UV-Vis a diferentes concentraciones de amarillo 57.

Como se muestra en la figura 4.20, el intervalo lineal de respuesta se encuentra entre 5 y 40 mg/L, permitiendo construir una curva de calibración válida para la cuantificación del colorante en los ensayos de adsorción. La ecuación obtenida por regresión lineal fue:

$$y = 0.05212x - 0.18558 \quad \text{Ecuación 4. 1}$$

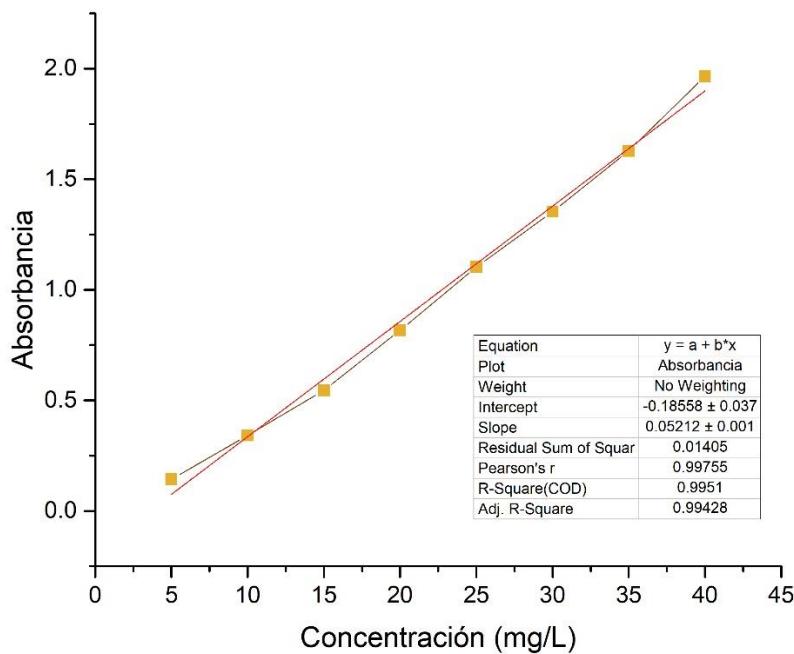


Figura 4.20 Curva de calibración del amarillo 57.

b)Amarillo 5

De manera similar, los barridos espectrales realizados para el Amarillo 5 (figura 4.21) permitieron identificar su pico máximo de absorbancia en 427 nm, en concordancia con la información técnica del compuesto. Se observó que la señal espectral se satura a concentraciones superiores a 50 mg/L, por lo que se definió un intervalo lineal entre 5 y 50 mg/L.

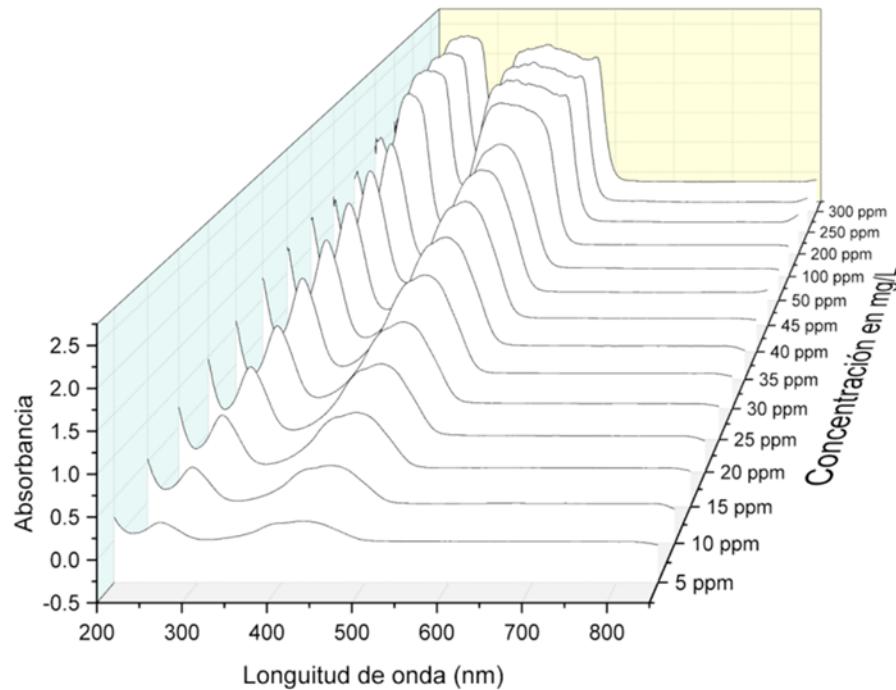


Figura 4.21 Barridos de UV-Vis a diferentes concentraciones de amarillo 5.

La curva de calibración obtenida para este colorante se muestra en la figura 4.22, y la ecuación de regresión lineal fue:

$$y = 0.042x + 0.0006 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

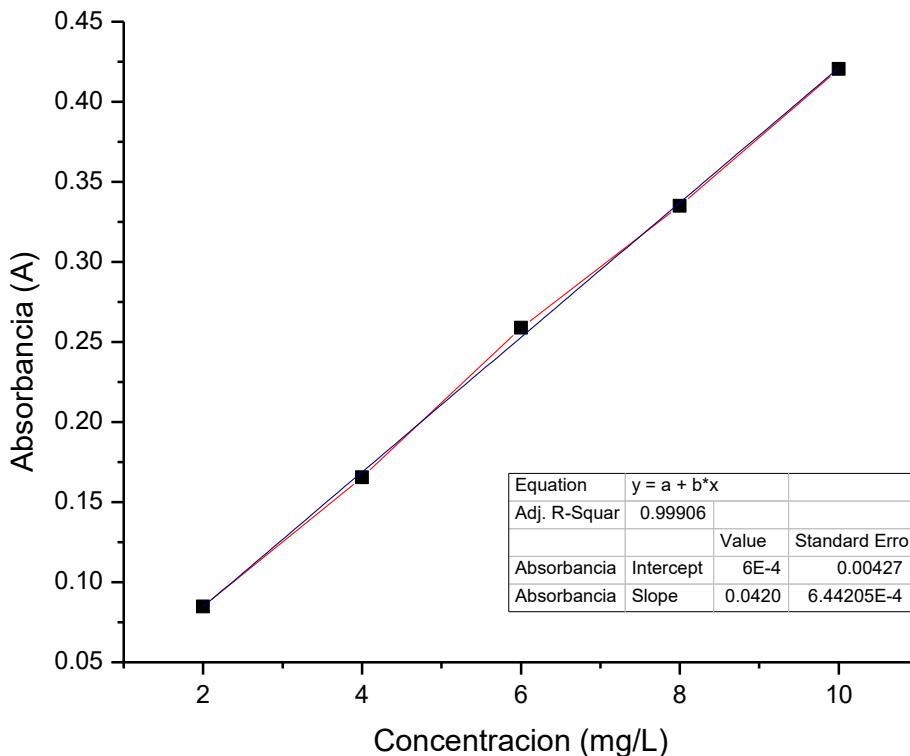


Figura 4.22 Curva de calibración del amarillo 5.

4.3.2 Cálculo de la difusividad de colorante

La difusividad efectiva de los colorantes Amarillo 57 y Amarillo 5 se estimó utilizando la ecuación de Wilke-Chang (Ecuación 4.3), la cual permite calcular la difusividad de solutos en líquidos a partir de parámetros fisicoquímicos del sistema:

$$D_{AB} = 1.173 \times 10^{-16} (\varphi M_B)^{1/2} \frac{T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Se realizaron cálculos a tres temperaturas distintas (283 K, 303 K y 323 K), considerando las propiedades del agua como solvente y los parámetros moleculares de cada colorante.

Amarillo 57

- Peso molecular estimado: 371.87 g/mol
- Volumen molar: $422.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kmol}$

Amarillo 5

- Peso molecular estimado: 534 g/mol
- Volumen molar: $455.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kmol}$

Tabla 4.2 Difusividades de colorante amarillo 5 y 57 a diferentes temperaturas.

	D_{AB}		
	$T_1=283 \text{ K}$	$T_2=303 \text{ K}$	$T_3=323 \text{ K}$
Amarillo 57	$2.91488 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$5.11152 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$7.94923 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Amarillo 5	$2.78619 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$4.88584 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$7.59827 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Estos resultados confirman que la temperatura influye directamente en la difusividad de los colorantes, observándose un incremento progresivo de D_{AB} conforme aumenta la temperatura. Esta información es relevante para interpretar los fenómenos de transporte en los ensayos cinéticos y para ajustar los modelos de adsorción en función de las condiciones térmicas del sistema.

4.3.3 Efecto de la agitación en la adsorción de colorantes

El objetivo de esta evaluación fue determinar la velocidad de agitación óptima para maximizar la eficiencia del proceso de adsorción de colorantes sobre películas a base de quitosano. Se realizaron ensayos utilizando colorantes representativos, entre ellos Amarillo 5, Rojo 2 y Azul 1, bajo condiciones controladas de concentración, temperatura y tiempo de contacto.

En la figura 4.23 se presentan los resultados obtenidos. Para el colorante Amarillo 5, se observó que la capacidad de adsorción aumenta con la velocidad de agitación hasta alcanzar un máximo a 200 rpm, a partir del cual se presenta una disminución progresiva. Esta velocidad se seleccionó como la óptima, alcanzando una remoción máxima de 795.64 mg/g. Este comportamiento sugiere que a velocidades superiores se puede generar turbulencia excesiva que afecta la estabilidad del sistema adsorbente.

En el caso del colorante Rojo 2, se identificó un comportamiento similar, con una capacidad de adsorción máxima a 250 rpm, alcanzando un valor de 659.61 mg/g. A velocidades mayores, la eficiencia disminuyó, posiblemente debido a la desestabilización de la película o a la reducción del tiempo de contacto efectivo.

Para el colorante Azul 1, también se determinó una velocidad óptima de 250 rpm, con una remoción máxima de 649.96 mg/g. En todos los casos, se observó que velocidades de agitación moderadas favorecen la ruptura de la capa límite difusiva (film) y mejoran la transferencia de masa del colorante hacia los sitios activos del adsorbente.

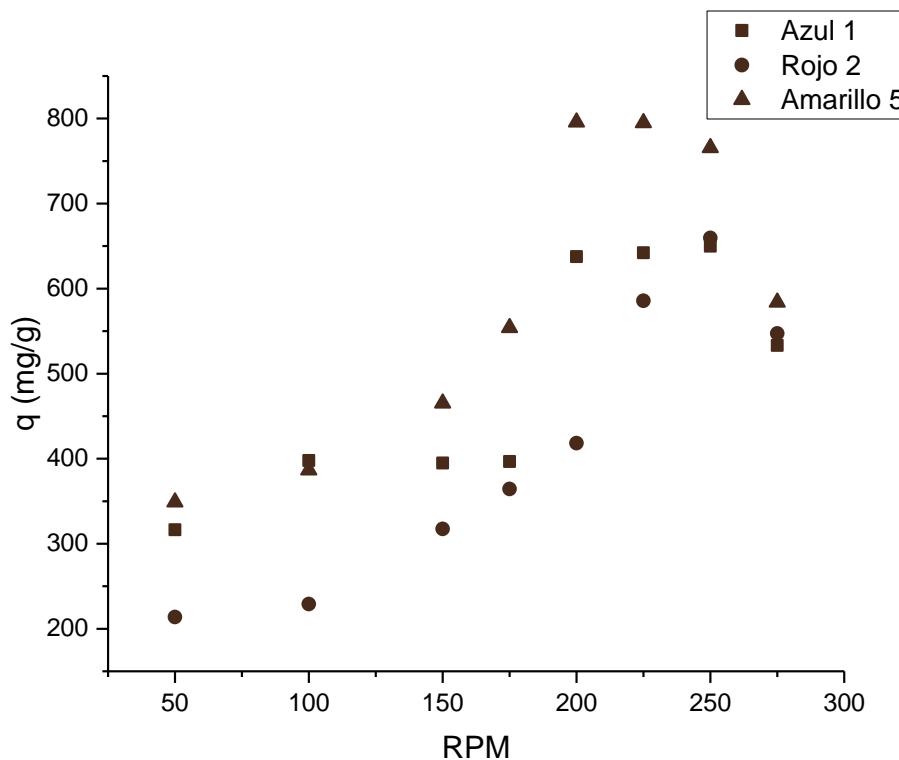


Figura 4.23 Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción del colorante rojo 2, amarillo 5 y azul 1.

A partir de estas pruebas se seleccionó una agitación de 200 rpm como agitación óptima para los procesos de adsorción.

4.3.4 Determinación del pKa de colorantes

La determinación del pKa de los colorantes Amarillo 5 y Amarillo 57 se realizó mediante dos enfoques complementarios: análisis teórico por software y análisis experimental por espectrofotometría UV-Visible. Esta caracterización permitió identificar las especies predominantes en función del pH y establecer las condiciones óptimas para su interacción con el adsorbente.

b) Amarillo 57

Análisis teórico

El análisis teórico del Amarillo 57 (figura 4.24) muestra tres especies principales en el intervalo de pH 0–14. Una especie se presenta entre pH 0–3, otra entre pH 8.5–13, y una tercera predomina en casi todo el rango. Esta última es la más relevante para el proceso de adsorción, especialmente en condiciones básicas.

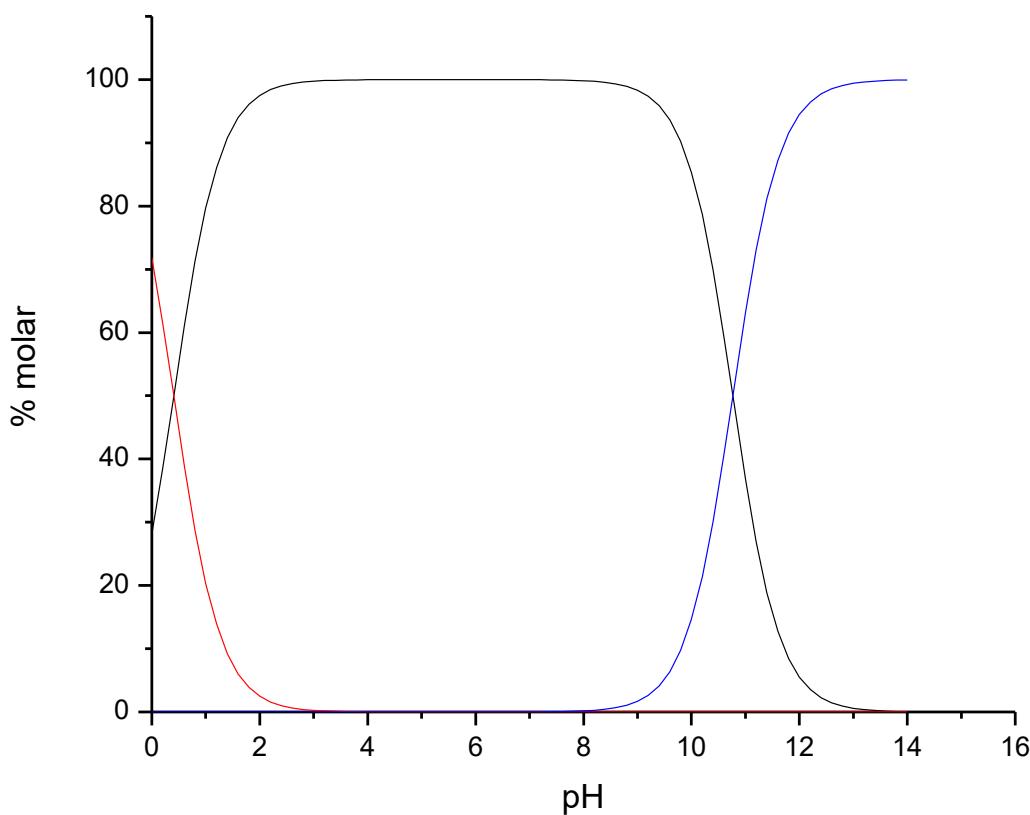


Figura 4.24 Diagrama de especiación teórica del colorante amarillo 57.

Las estructuras moleculares correspondientes (figura 4.25) sugieren que la interacción con el quitosano puede involucrar grupos carbonilo (C=O), aminas primarias ($-\text{NH}_2$), y mecanismos de sustitución nucleofílica aromática, además de enlaces por puentes de hidrógeno en medios polares.

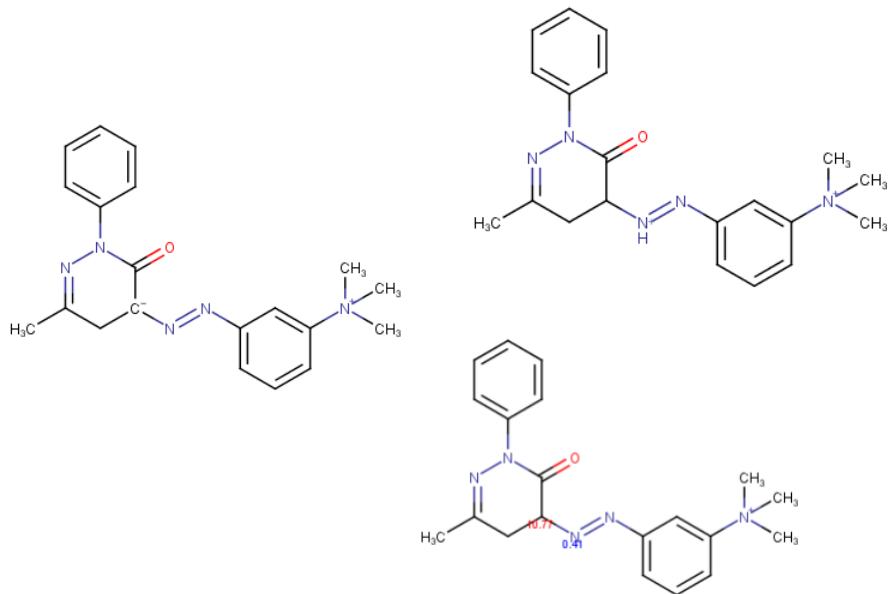


Figura 4.25 Diferentes especies del amarillo 57 en el rango de pH.

Análisis experimental

Los barridos espectrales realizados a diferentes valores de pH (figura 4.26) muestran que la longitud de onda del cromóforo permanece constante en 383 nm entre pH 1 y 9. A partir de pH 10, se observa un ligero desplazamiento, lo que indica la formación de nuevas especies.

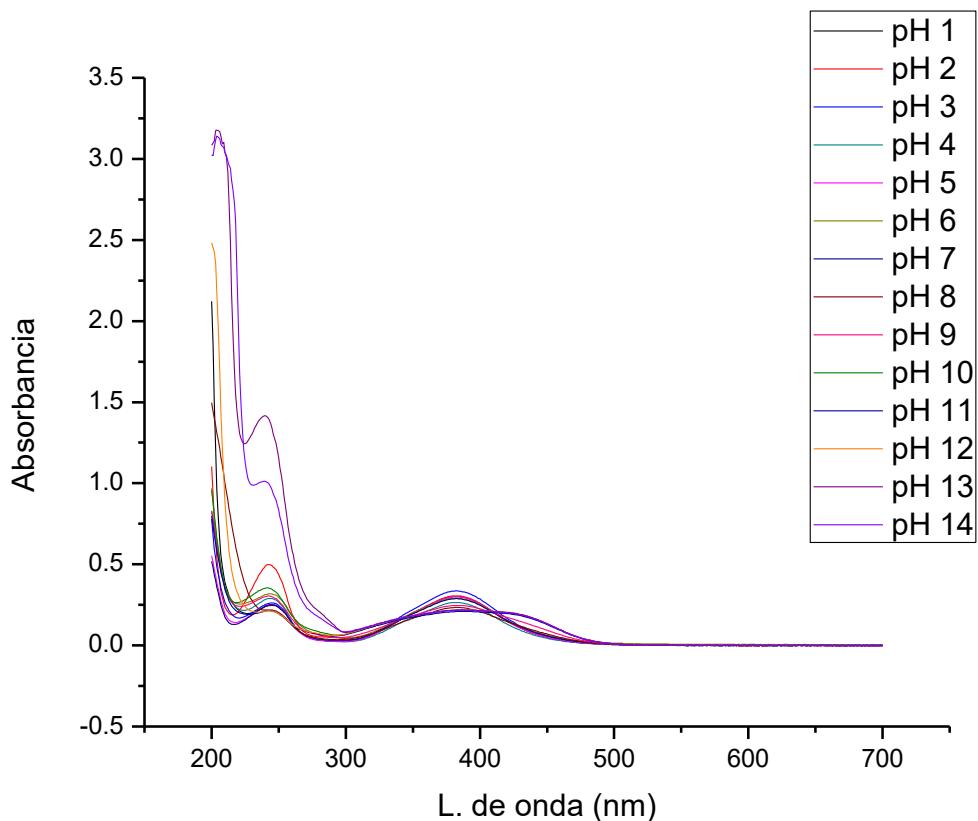


Figura 4.26 Barridos del colorante amarillo 57 a diferentes pH's.

El diagrama de especiación experimental (figura 4.27) revela la presencia de cinco especies, de las cuales una predomina ampliamente en todo el rango de pH. Esta especie es la que se considera más activa en el proceso de adsorción, dada su estabilidad y alta proporción relativa.

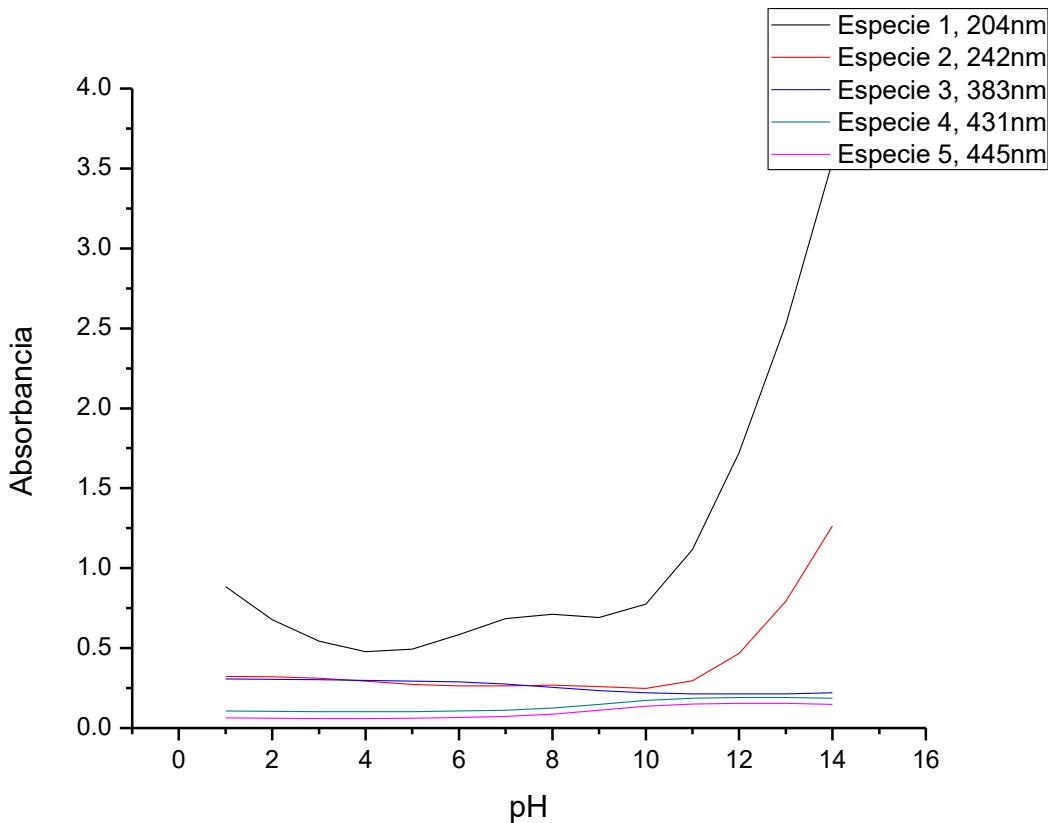


Figura 4.27 Diagrama de especiación experimental del colorante amarillo 57.

b) Amarillo 5

Análisis teórico

La predicción teórica del pKa se realizó utilizando el software MarvinSketch 16.7.18.0. El diagrama de especiación generado (figura 4.28) muestra cinco especies distintas en el intervalo de pH 0–14. La especie 4 predomina en la mayor parte del rango, mientras que la especie 3 se presenta entre pH 0–4 y la especie 5 entre pH 10–14. Esta información permite inferir qué especie está presente en las condiciones de adsorción y cuál es el grupo funcional responsable de la interacción con el quitosano.

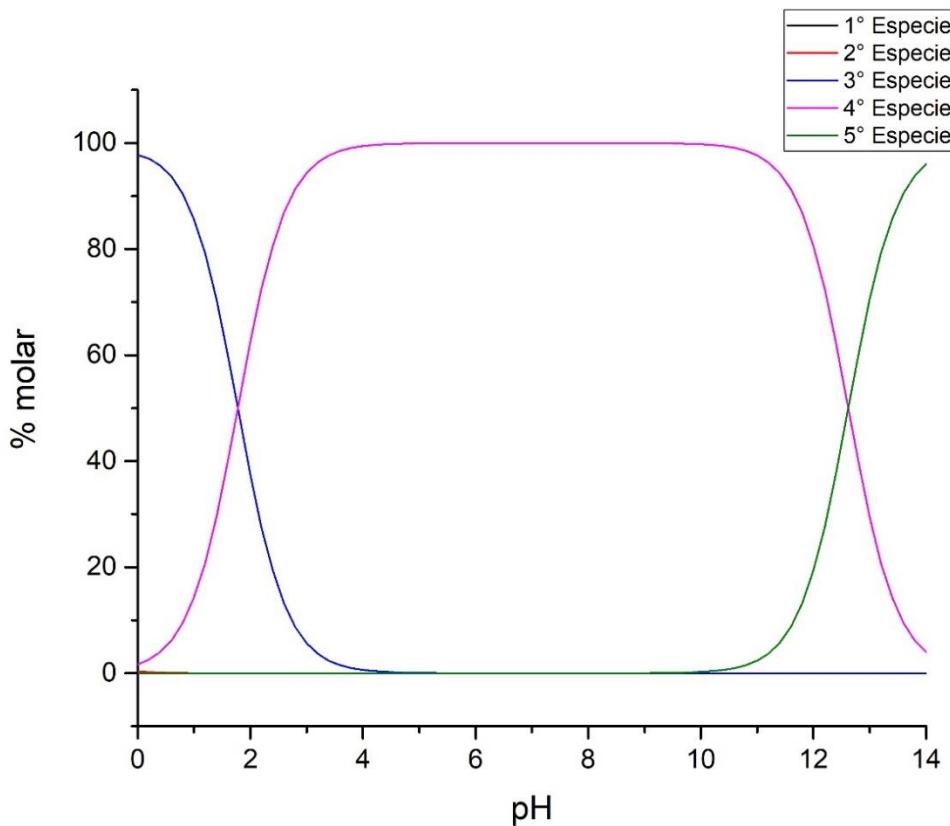


Figura 4.28 Diagrama de especiación teórica del colorante amarillo 5.

Las estructuras correspondientes a las especies teóricas se presentan en la figura 4.29, donde se destaca la presencia de grupos sulfonato aniónicos como principales responsables de la interacción electrostática con los grupos amino del quitosano.

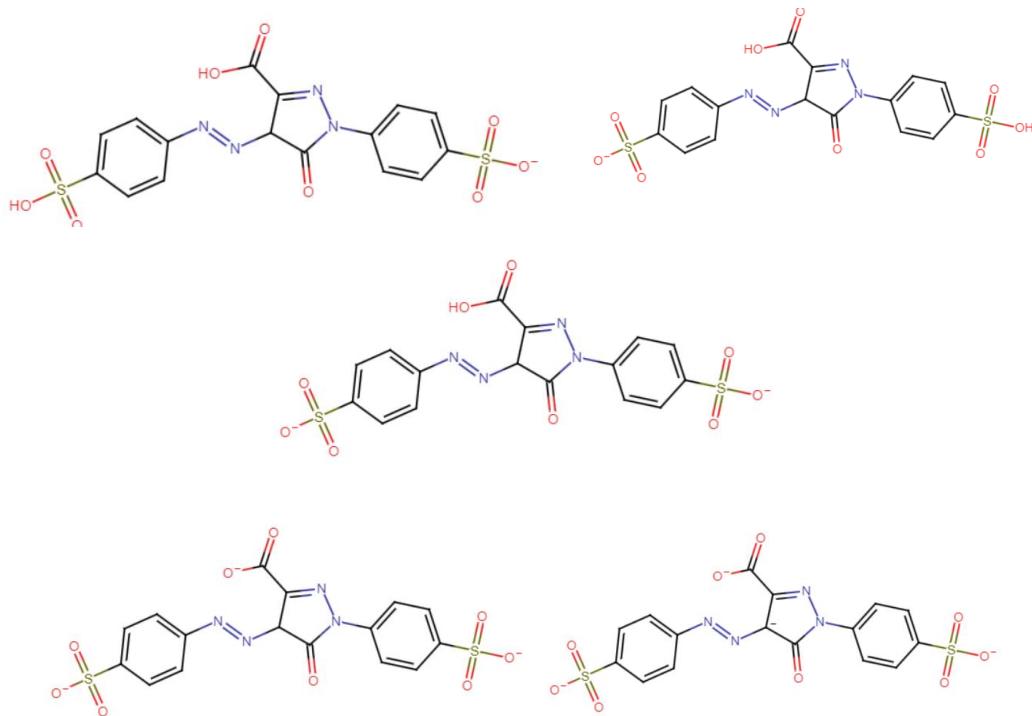


Figura 4.29 Diferentes especies del amarillo 5 en el rango de pH.

Análisis experimental

Los barridos espectrales realizados a diferentes valores de pH (figura 4.30) muestran que, en el rango de pH 11–13, se produce un desplazamiento en las longitudes de onda características del cromóforo, observándose señales en 239, 254 y 407 nm. En pH menores a 10, la longitud de onda se mantiene constante en 426 nm, lo que indica estabilidad estructural en ese intervalo.

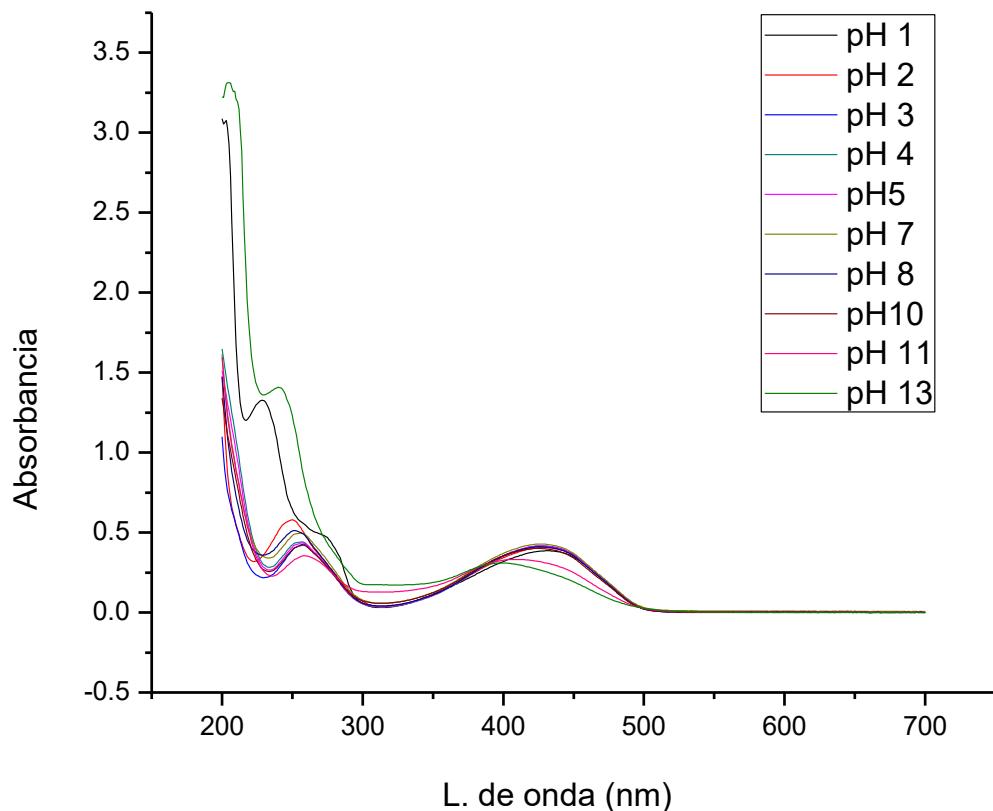


Figura 4.30 Barridos del colorante amarillo 5 a diferentes pH's

El diagrama de especiación experimental (figura 4.31), construido a partir de los barridos espectrales, confirma la presencia de cinco especies, de las cuales tres predominan entre pH 4 y 8. Estas son las más relevantes para el proceso de adsorción, ya que coinciden con el intervalo de mayor eficiencia observado en los ensayos

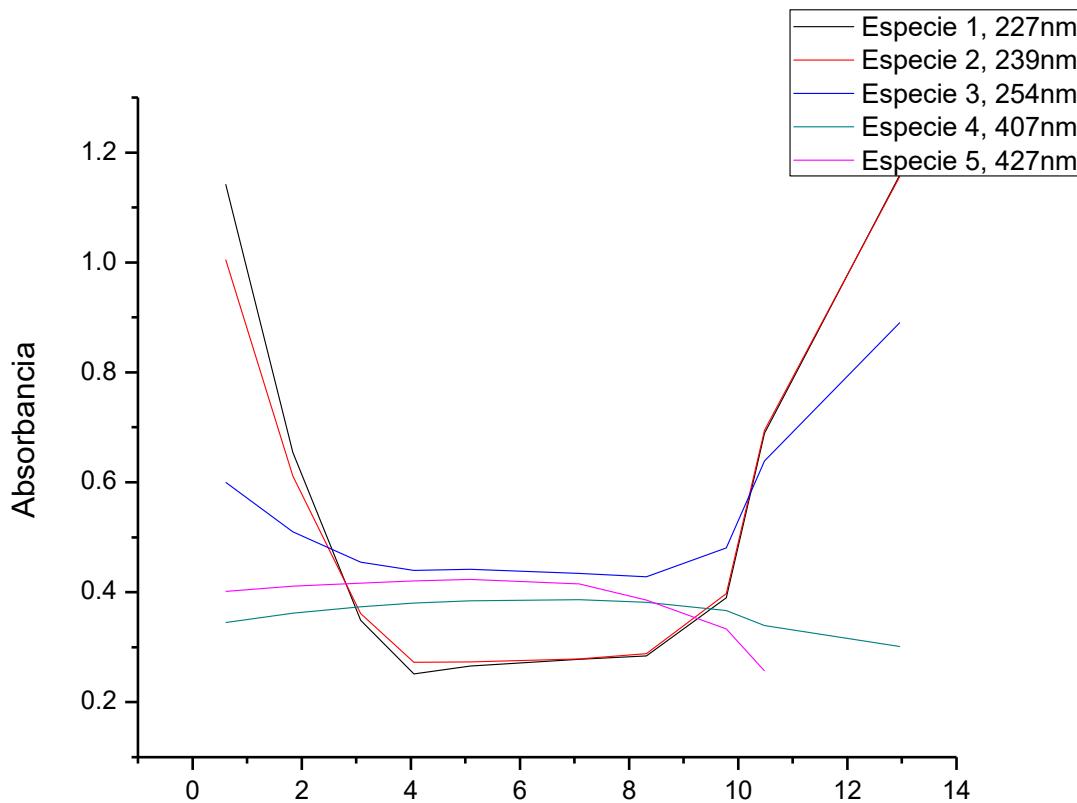


Figura 4.31 Diagrama de especiación experimental del colorante amarillo 5.

4.3.5 Efecto de pH sobre la capacidad de adsorción

Se evaluó el efecto del pH sobre la capacidad de adsorción de los colorantes Amarillo 5 y Amarillo 57 utilizando películas a base de quitosano como material adsorbente. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 4.32, 4.33 y 4.34.

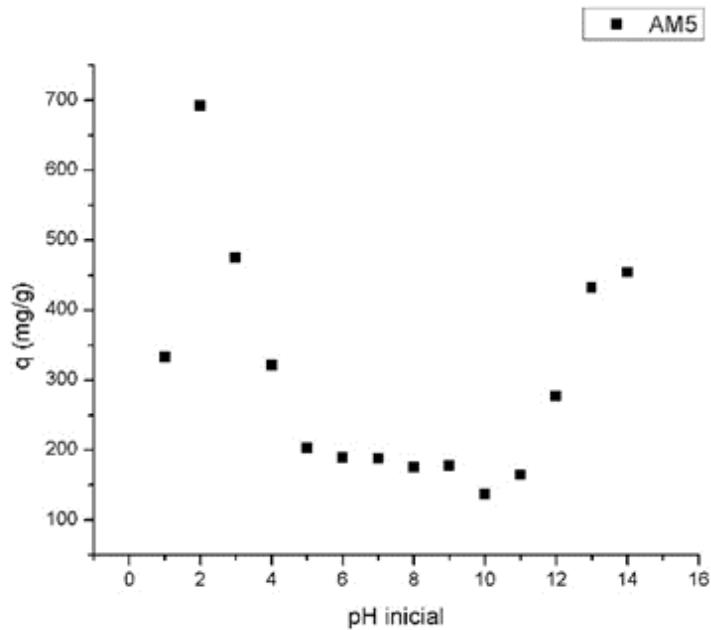


Figura 4.32 Efecto de pH en la adsorción de amarillo 5 con película a base de quitosano.

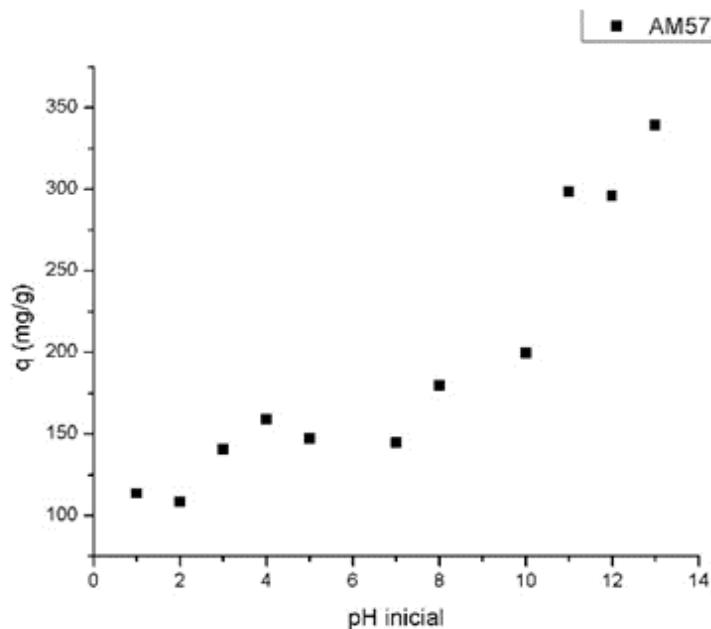


Figura 4.33 Efecto de pH en la adsorción de amarillo 57 con película a base de quitosano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en las figuras, los colorantes presentan comportamientos opuestos en función del pH. El Amarillo 5 muestra una mayor capacidad de adsorción en condiciones ácidas, específicamente entre pH 1 y 3, alcanzando un máximo de 692.38 mg/g a pH 2. En contraste, el Amarillo 57 presenta su mayor adsorción en condiciones básicas, entre pH 12 y 14, con un valor máximo de 339.35 mg/g a pH 13.

Este comportamiento se atribuye a la influencia del pH sobre la carga superficial del quitosano y la ionización de los grupos funcionales de los colorantes. En medio ácido, los grupos amino del quitosano se protonan ($\text{-NH}_2 \rightarrow \text{-NH}_3^+$), generando una superficie cargada positivamente que favorece la interacción electrostática con los grupos sulfonato aniónicos del Amarillo 5. A medida que el pH se incrementa hacia valores neutros, la protonación disminuye, reduciendo la capacidad de adsorción. Sin embargo, a pH básicos extremos (≥ 12.5), se observa una recuperación parcial de la capacidad adsorbente, posiblemente por reconfiguración superficial del polímero.

En el caso del Amarillo 57, el comportamiento es inverso. A pH básicos, el colorante presenta grupos catiónicos que pueden interactuar con los grupos funcionales del quitosano mediante enlaces de hidrógeno, interacciones electrostáticas o mecanismos de sustitución nucleofílica. Esto explica el incremento en la capacidad de adsorción conforme aumenta la basicidad del medio.

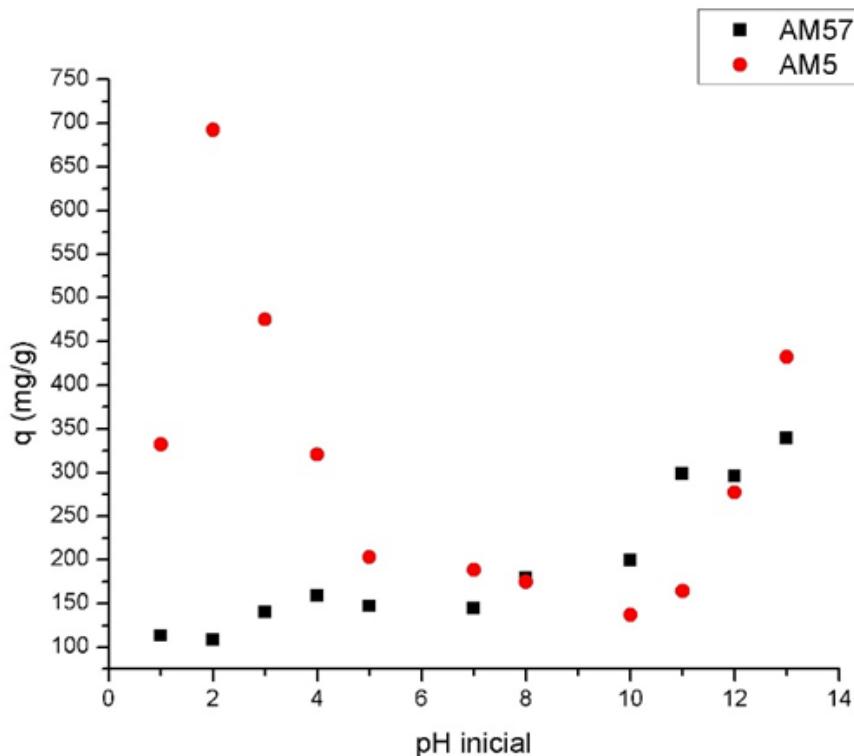


Figura 4.34 Comparación del efecto de pH en la adsorción de Amarillo 5 y Amarillo 57 sobre película de quitosano.

La figura comparativa (Figura 4.34) muestra que ambos colorantes pueden ser adsorbidos en condiciones básicas, con capacidades similares en pH intermedios como 8 y 12. Este comportamiento sugiere que, en sistemas multicomponente, podría existir competencia por los sitios activos del adsorbente. La versatilidad de la película de quitosano frente a diferentes condiciones de pH permite su aplicación en sistemas de tratamiento que involucren mezclas de colorantes con propiedades ácido-base contrastantes.

4.4 Cinéticas de adsorción

4.4.1 Sistema un solo componente

a) Cinética Amarillo 57

Siguiendo el protocolo descrito en el apartado de metodología, se realizaron pruebas cinéticas de adsorción del colorante Amarillo 57 (AM57) utilizando películas

a base de quitosano como material adsorbente. Las condiciones experimentales incluyeron tres temperaturas (10, 30 y 50 °C) y un pH de 12.5, previamente determinado como óptimo para este colorante. Las concentraciones residuales se evaluaron en función del tiempo, y las capacidades de adsorción se expresaron en mg de colorante por gramo de película seca.

En la figura 4.35 se presentan las curvas de adsorción obtenidas, donde se observa un incremento progresivo en la cantidad adsorbida hasta alcanzar el equilibrio aproximadamente a las 48 horas en todas las temperaturas evaluadas.

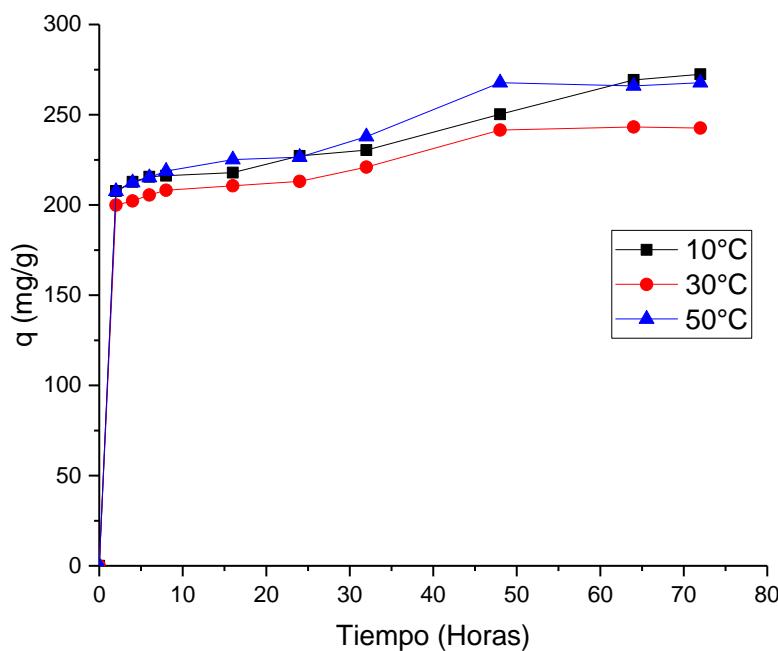


Figura 4.35 Cinética de adsorción del colorante amarillo 57 a un pH de 12.5, con quitosano a temperaturas de 10,30 y 50 °C.

Los datos experimentales fueron ajustados a tres modelos cinéticos: Lagergren (pseudo primer orden), Ho-McKay (pseudo segundo orden) y Elovich. Los parámetros obtenidos se resumen en la Tabla 4.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.3 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM57 a pH 12.5 a 10, 30 y 50.
°C

Temp.	Lagergreen R^2 (pseudo primer orden/PPO)	K1	qe	Tiempo al equilibrio
10°C	0.92187	0.94948	236.06786	48 horas
30°C	0.95225	1.06148	221.75263	48 horas
50°C	0.92539	0.88168	239.34855	48 horas
	Ho R^2 (Pseudo segundo orden/PSO)	K2	qe	
10°C	0.94968	0.0071	246.82677	48 horas
30°C	0.9719	0.00973	229.93389	48 horas
50°C	0.95722	0.00629	251.0016	48 horas
	ELOVICH	α	β	
10°C	0.97996	882087.6521	0.05873	48 horas
30°C	0.99059	2.00E+07	0.07782	48 horas
50°C	0.98553	544848.9968	0.05582	48 horas

A continuación, en la figura 4.36, se muestran los ajustes a los modelos cinéticos antes mencionados de los datos obtenidos con las cinéticas de adsorción.

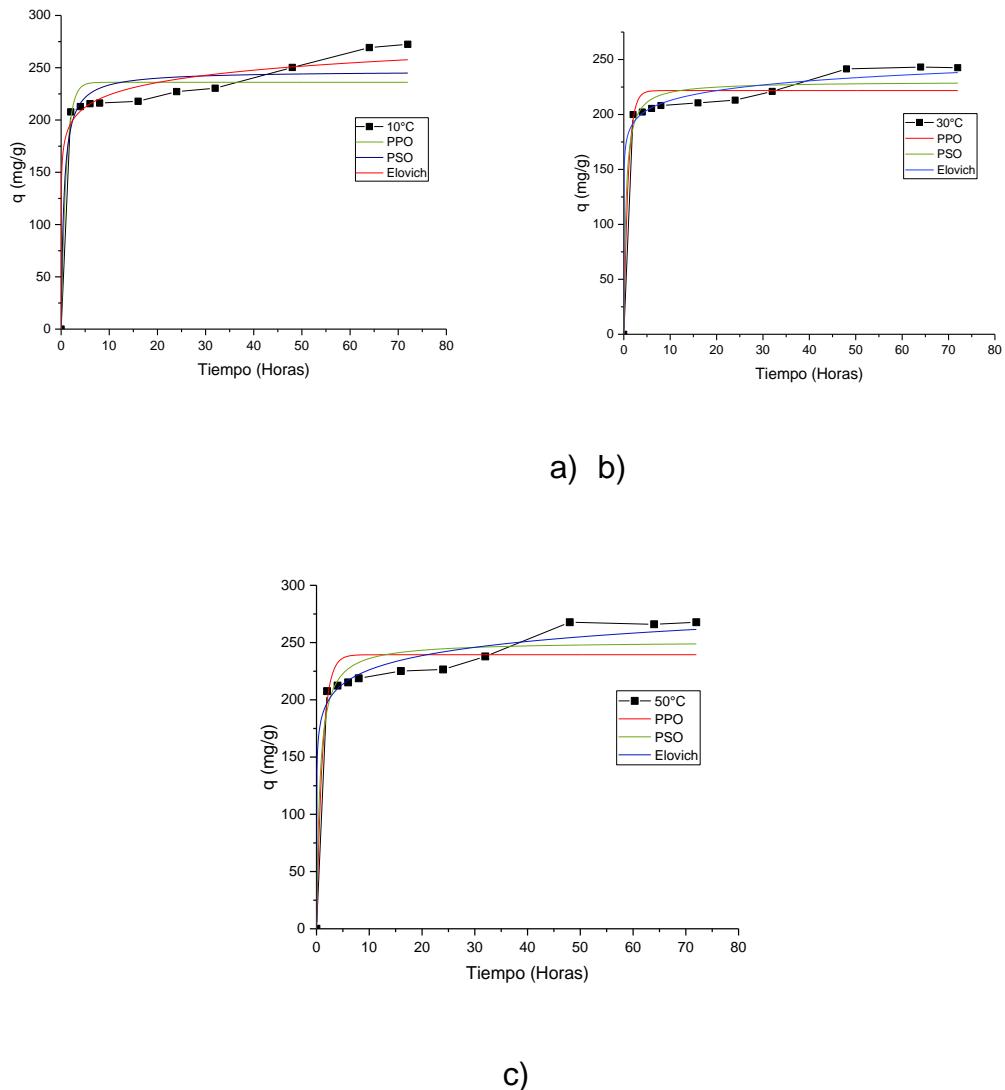


Figura 4.36 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM57 a pH 12.5, a) temperatura de 10°C, b) temperatura de 30°C y c) temperatura de 50°C .

Los resultados cinéticos muestran que el modelo de pseudo segundo orden (PSO) describe adecuadamente el proceso de adsorción del colorante sobre las películas

de quitosano entrecruzado con EGDE. Los coeficientes de correlación R^2 obtenidos para este modelo se ubicaron entre 0.9497 y 0.9719, siendo superiores a los del modelo de Lagergren (pseudo primer orden, PPO). Este comportamiento indica que el mecanismo predominante es de tipo quimisorción, probablemente asociado a interacciones específicas entre los grupos funcionales del quitosano ($-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$) y los del colorante ($-\text{SO}_3^-$, $-\text{N}=\text{N}-$).

El modelo de Elovich también presentó ajustes excelentes, con valores de R^2 entre 0.9799 y 0.9906, lo cual sugiere que la superficie del adsorbente es heterogénea, con sitios activos que presentan diferentes energías de adsorción. Este comportamiento es consistente con la modificación estructural causada por el entrecruzamiento con EGDE, que genera microambientes heterogéneos y distribuciones irregulares de grupos activos.

En todas las condiciones evaluadas, el sistema alcanzó el equilibrio alrededor de las 48 horas, independientemente de la temperatura.

Las capacidades de adsorción al equilibrio (q_e) fueron ligeramente mayores a 50 °C, lo que sugiere que el proceso es endotérmico, favorecido por el aumento de temperatura y la mayor movilidad molecular del colorante.

Cinética de adsorción del colorante Amarillo 57 a pH neutro

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema fuera de condiciones óptimas, se realizaron pruebas cinéticas adicionales a pH neutro (≈ 7), bajo las mismas condiciones de temperatura. Las curvas de adsorción se presentan en la Figura 4.37, y los ajustes a los modelos cinéticos en la figura 4.38. Los parámetros obtenidos del ajuste se resumen en la Tabla 4.4.

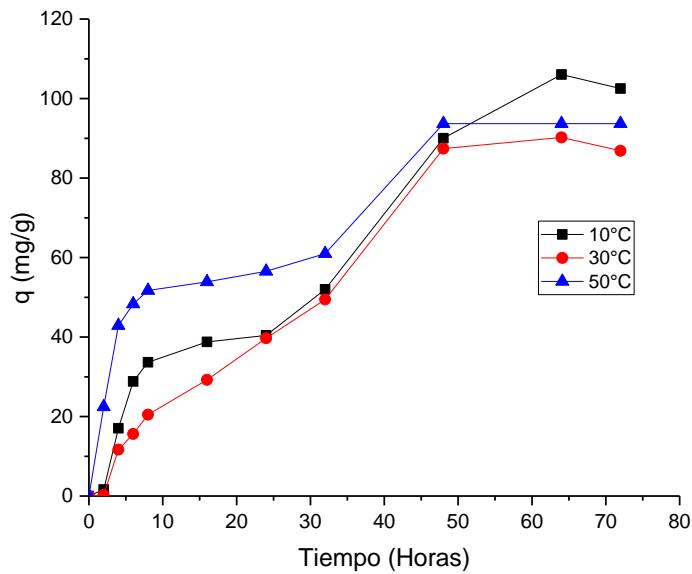


Figura 4.37 Cinética de adsorción de AM57 a pH neutro, con película de quitosano a 10, 30 y 50 °C.

Tabla 4.4 Datos cinéticos de la adsorción del colorante amarillo 57 a un pH neutro.

Temp.	Lagergreen R^2 (pseudo primer orden/PPO)	K1	qe	Tiempo al equilibrio
				Ho R^2 (Pseudo segundo orden/PSO)
10°C	0.94399	0.018	146.05366	
30°C	0.97166	0.01748	130.55003	
50°C	0.81073	0.10827	82.2534	
ELOVICH				
10°C	0.9458	5.75E-05	221.40221	
30°C	0.9706	5.27E-05	211.29136	
50°C	0.88215	0.00138	95.35876	
10°C	0.94824	3.12672	0.01289	
30°C	0.96973	2.44225	0.01203	
50°C	0.92595	24.5323	0.04945	

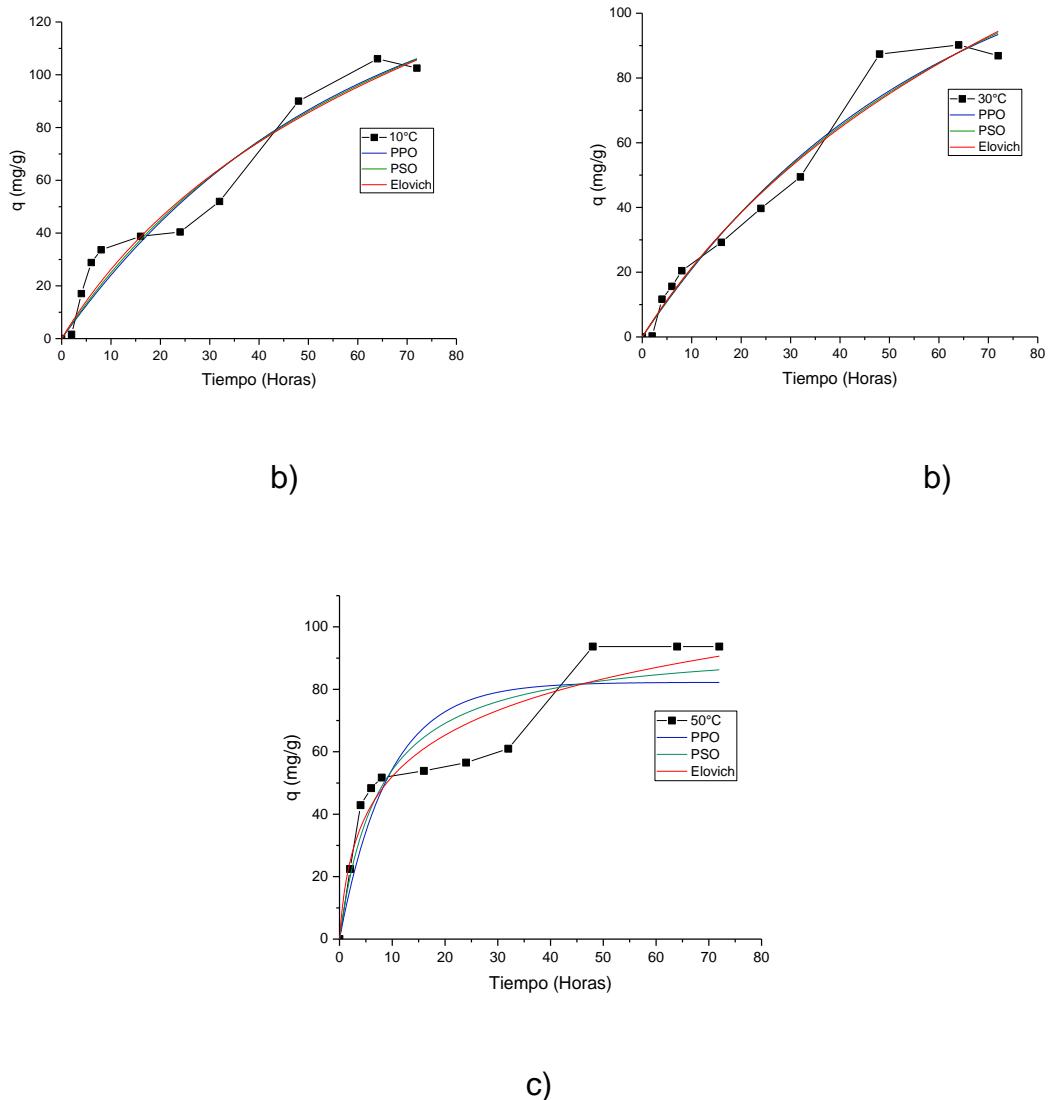


Figura 4.38 Ajuste a modelos cinéticos para AM57 a pH neutro a 10 °C, b) 30 °C, c) 50 °C.

Los resultados muestran que la capacidad de adsorción disminuye significativamente en medio neutro comparado con los obtenidos a pH de 12.5, con valores de q_e entre 82.25 y 221.40 mg/g. Esto se atribuye a la menor protonación de los grupos amino del quitosano, lo que reduce la densidad de carga positiva y debilita las interacciones electrostáticas con los grupos sulfonato del colorante.

El modelo de pseudo primer orden (PPO) mostró mejor ajuste a bajas temperaturas, mientras que el modelo de Elovich reflejó la heterogeneidad superficial del adsorbente. A 50 °C, se observó una disminución en R^2 , lo que sugiere posibles efectos de desorción o debilitamiento de las interacciones.

Comparando los resultados de ambos pH, se concluye que la adsorción de AM57 es más eficiente en medio alcalino, donde el proceso es endotérmico y dominado por quimisorción. En cambio, a pH neutro, el proceso es más limitado, posiblemente de tipo fisisorción, y favorecido a bajas temperaturas, lo que indica un comportamiento exotérmico.

a) Cinética Amarillo 5

El estudio cinético de la adsorción del colorante Amarillo 5 (AM5) sobre películas a base de quitosano se realizó a pH 2.5, condición previamente determinada como óptima debido a la alta protonación de los grupos amino ($-\text{NH}_3^+$) del biopolímero. Las pruebas se llevaron a cabo a tres temperaturas (10, 30 y 50 °C), con el objetivo de evaluar el efecto térmico sobre la velocidad de adsorción y la capacidad de equilibrio (q_e). Las capacidades de adsorción se expresaron en mg de colorante por gramo de material seco.

La evolución temporal del proceso se muestra en la figura 4.39, mientras que los parámetros cinéticos obtenidos para los modelos de pseudo primer orden (PPO), pseudo segundo orden (PSO) y Elovich se resumen en la Tabla 4.5. Los ajustes a dichos modelos se presentan en la figura 4.40.

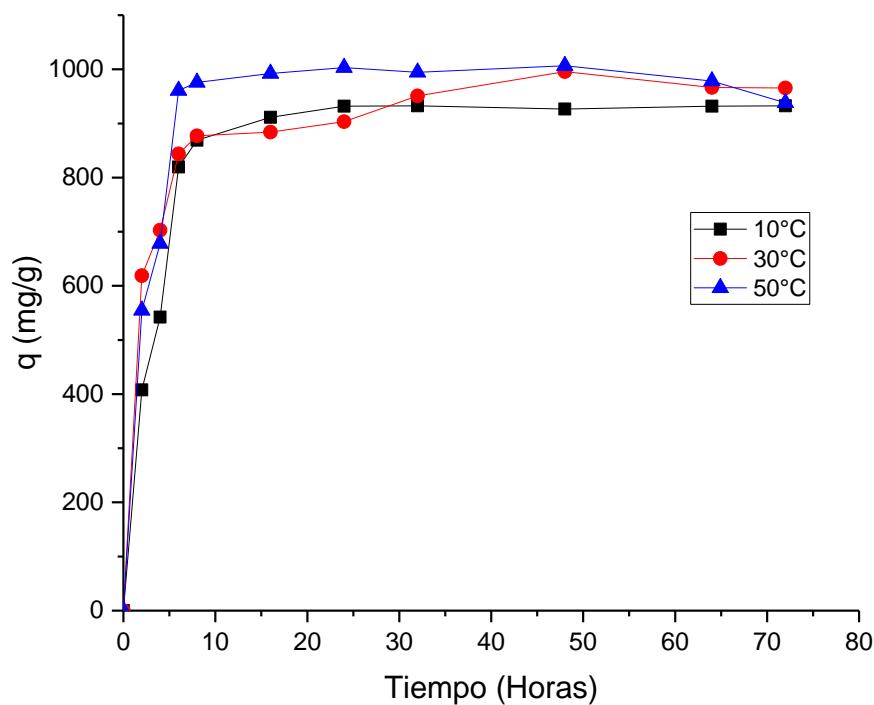


Figura 4.39 Cinética de adsorción del colorante Amarillo 5 a pH 2.5 con quitosano a 10, 30 y 50 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.5 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM5 a pH 2.5.

	<i>Lagergreen R²</i> (pseudo primer orden/PPO)	<i>K₁</i>	<i>qe</i>	<i>Tiempo al equilibrio</i>
10°C	0.98654	0.27702	934.98666	8 horas
30°C	0.9744	0.43351	934.81386	8 horas
50°C	0.98007	0.37822	991.87629	8 horas
	Ho R ² (Pseudo segundo orden/PSO)	K ₂	qe	
10°C	0.96277	4.35E-04	1001.3661	8 horas
30°C	0.99131	8.05E-04	984.99648	8 horas
50°C	0.95504	6.82E-04	1040.54827	8 horas
	ELOVICH	α	B	
10°C	0.90261	4713.52625	0.00776	8 horas
30°C	0.97789	76179.1184	0.0109	8 horas
50°C	0.89705	85125.4856	0.01053	8 horas

Los resultados indican que el equilibrio se alcanzó rápidamente (~8 horas) en todas las temperaturas, lo que sugiere un proceso dominado por interacciones específicas y eficientes entre el colorante y los sitios activos del quitosano. Las capacidades de adsorción al equilibrio fueron elevadas, entre 934 y 1040 mg/g, lo que evidencia una fuerte afinidad del AM5 por el adsorbente (figura 4.40).

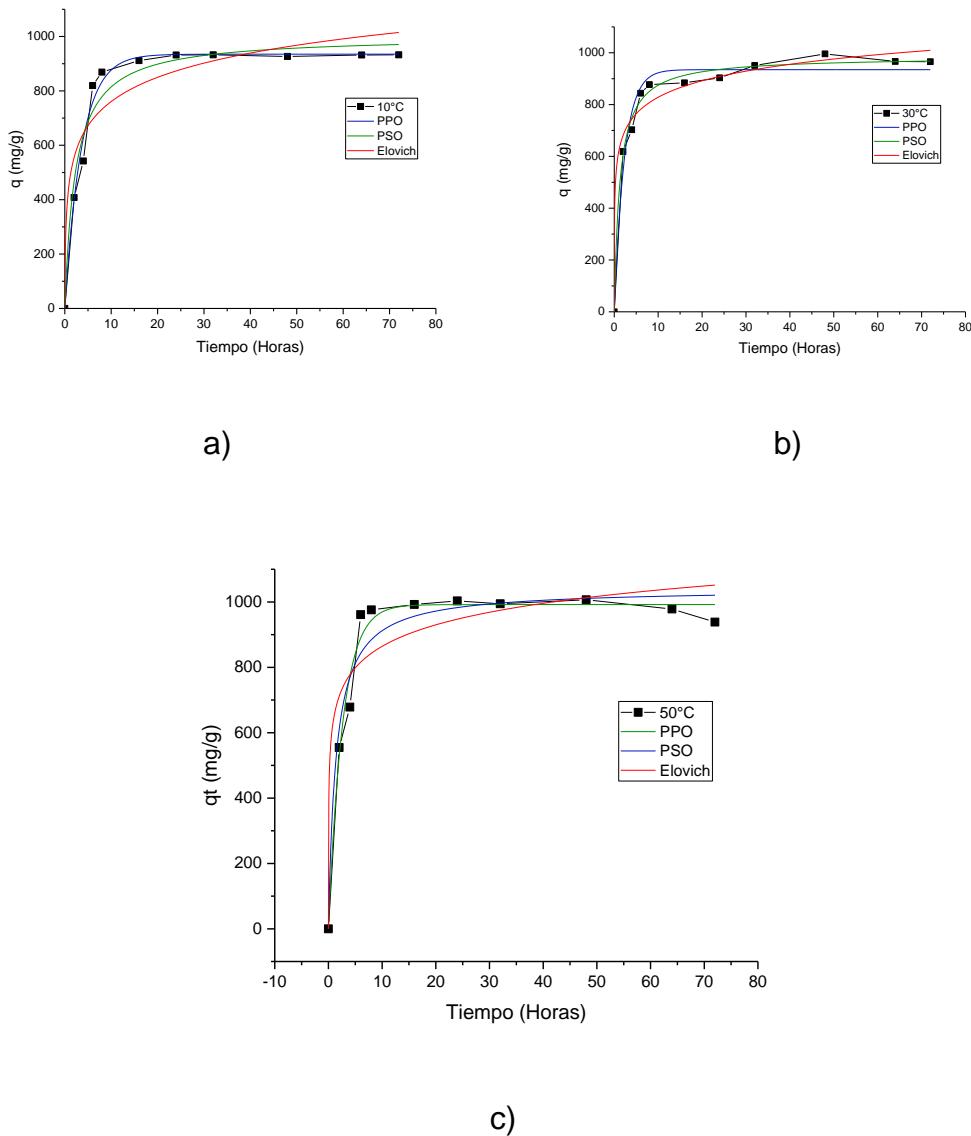


Figura 4.40 Ajuste a modelos cinéticos para AM5 a pH 2.5, a) 10°C , b) 30°C , c) 50°C .

El modelo de pseudo segundo orden (PSO) fue el que mejor describió el comportamiento cinético, especialmente a 30°C ($R^2 = 0.9913$), con una capacidad teórica (q_e) de 984.99 mg/g , muy cercana a la experimental. Esto sugiere que el mecanismo predominante es de tipo quimisorción, asociado a la formación de enlaces electrostáticos y de hidrógeno entre los grupos funcionales del colorante ($-\text{SO}_3^-$, $-\text{N}=\text{N}-$) y los grupos protonados del quitosano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de pseudo primer orden (PPO) también mostró buenos ajustes ($R^2 = 0.97\text{--}0.98$), lo que indica que en las etapas iniciales del proceso predomina una adsorción física rápida, seguida por una etapa de interacción específica. El modelo de Elovich presentó ajustes satisfactorios, especialmente a 30 °C ($R^2 = 0.97$), con valores elevados de α , lo que sugiere una alta tasa inicial de adsorción. El incremento de β con la temperatura indica una saturación más rápida de los sitios activos a temperaturas elevadas.

El efecto de la temperatura fue moderado: aunque la capacidad de adsorción aumentó ligeramente de 934 a 1040 mg/g entre 10 y 50 °C, las constantes cinéticas no mostraron un incremento proporcional. Esto sugiere un proceso ligeramente endotérmico, favorecido por la mayor movilidad molecular del colorante y la expansión de la red polimérica del quitosano.

En conjunto, los resultados confirman que la adsorción de AM5 es rápida, eficiente y está controlada principalmente por un mecanismo de quimisorción, con fuerte dependencia del pH ácido y una influencia térmica moderada.

Cinética de adsorción del colorante Amarillo 5 a pH neutro

Con el fin de evaluar el efecto del pH sobre la cinética de adsorción, se realizaron pruebas adicionales a pH 7, utilizando las mismas condiciones experimentales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.6, mientras que las curvas de adsorción y los ajustes a los modelos cinéticos se muestran en las figuras 4.41 y 4.42, respectivamente.

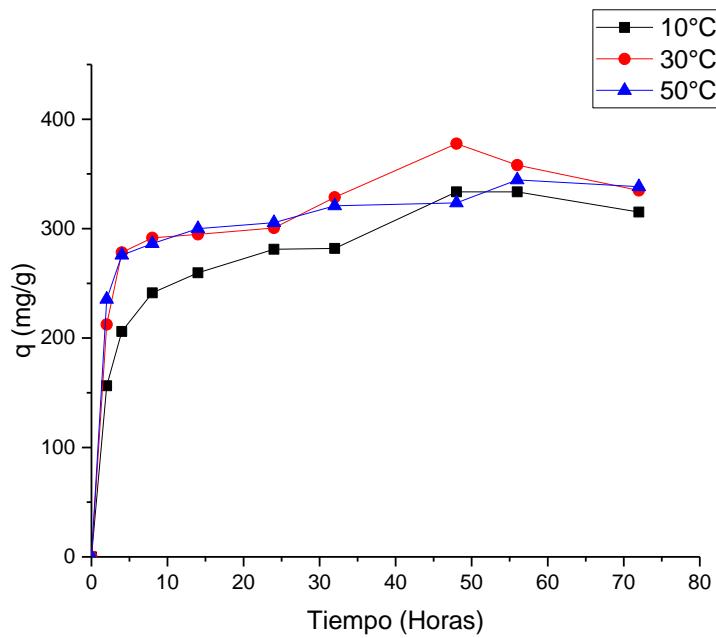


Figura 4.41 Cinética de adsorción de AM5 a pH neutro con quitosano a 10, 30 y 50 °C.

Tabla 4.6 Parámetros cinéticos de la adsorción de AM5 a pH 7.

	Lagergreen R^2 (pseudo primer orden/PPO)	$K1$	qe	Tiempo al equilibrio
10°C	0.93709	0.28455	299.96336	48 horas
30°C	0.94075	0.48309	328.25835	48 horas
50°C	0.96937	0.61704	316.6581	48 horas
	Ho R^2 (Pseudo segundo orden/PSO)	$K2$	qe	
10°C	0.97686	0.00123	325.99597	48 horas
30°C	0.96519	0.00223	347.72549	48 horas
50°C	0.9892	0.00345	330.86156	48 horas
	ELOVICH	A	β	
10°C	0.98591	811.38641	0.0213	48 horas
30°C	0.97027	11386.69862	0.0279	48 horas
50°C	0.99506	131065.0175	0.03739	48 horas

A diferencia del sistema ácido, a pH neutro el tiempo de equilibrio se extendió hasta 48 horas, lo que indica una reducción significativa en la velocidad de adsorción. Esto se atribuye a la menor protonación de los grupos amino del quitosano a este valor de pH, lo que reduce la densidad de carga positiva y debilita las interacciones electrostáticas con los grupos sulfonato del AM5.

Las capacidades de adsorción al equilibrio disminuyeron notablemente, con valores entre 299 y 347 mg/g, lo que representa una reducción superior al 60 % respecto a la condición ácida en el medio. A pesar de ello, el modelo de pseudo segundo orden (PSO) continuó siendo el que mejor describió el proceso ($R^2 = 0.96\text{--}0.99$), especialmente a 50 °C ($R^2 = 0.9892$), lo que indica que la quimisorción sigue siendo el mecanismo predominante, aunque con menor intensidad.

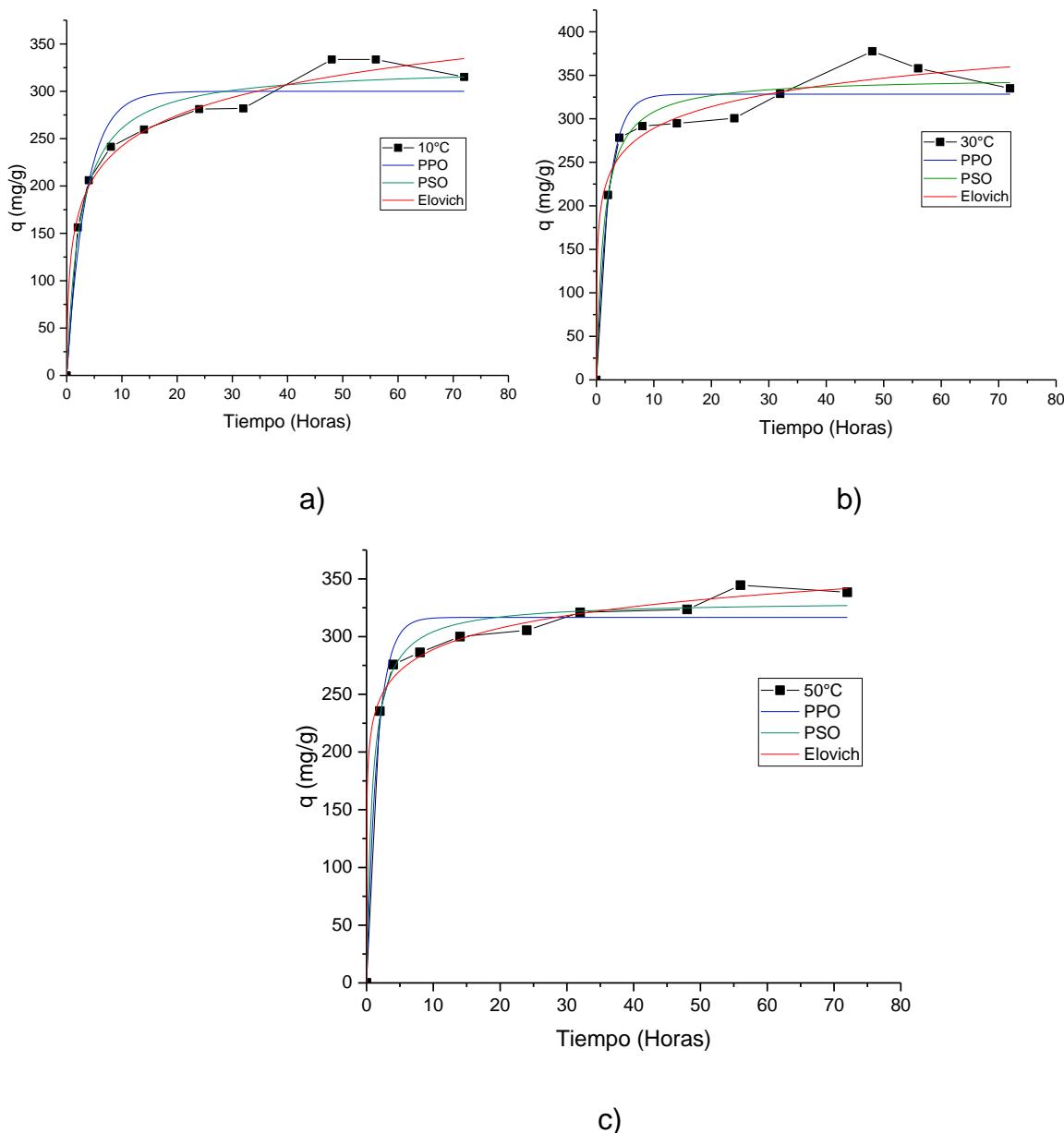


Figura 4.42 Ajuste a modelos cinéticos para AM5 a pH 7:a) 10 °C, b) 30 °C, c) 50 °C

El modelo de pseudo primer orden (PPO) mostró ajustes ligeramente menores ($R^2 = 0.93-0.96$), mientras que el modelo de Elovich presentó excelentes correlaciones ($R^2 > 0.97$), con valores crecientes de β a mayor temperatura, lo que sugiere una mayor heterogeneidad superficial y una distribución energética más amplia de los sitios activos.

El efecto de la temperatura fue más evidente en estas condiciones: se observó un incremento de q_e de 325.99 mg/g a 347.72 mg/g entre 10 y 30 °C, seguido de una ligera disminución a 330.86 mg/g a 50 °C. Esto sugiere una adsorción moderadamente endotérmica hasta 30 °C, con posible desorción parcial a temperaturas más altas.

En resumen, la adsorción de AM5 es altamente dependiente del pH, siendo mucho más eficiente en medio ácido. A pH neutro, la reducción de la carga superficial del quitosano limita las interacciones electrostáticas, afectando tanto la cinética como la capacidad de remoción del sistema.

4.5 Isotermas de adsorción

El análisis de isotermas de adsorción permite comprender el comportamiento del sistema en equilibrio, identificar el tipo de interacción entre adsorbente y adsorbato, y determinar la capacidad máxima de retención del material. En este apartado se presentan los resultados obtenidos para sistemas de un solo componente, utilizando películas a base de quitosano frente a los colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57), bajo distintas condiciones de pH.

4.5.1 Sistema un solo componente

Las pruebas se realizaron a temperatura constante de 30 °C y un tiempo de contacto de 48 horas. Se emplearon soluciones de colorante en concentraciones iniciales de 150 a 350 mg/L para AM5 y de 74 a 374 mg/L para AM57. Las condiciones de pH fueron: 2.5 y 7 para AM5, y 7 y 12.5 para AM57. La relación masa del adsorbente/volumen de solución se mantuvo entre 240 y 300 mg/L, bajo agitación constante de 200 rpm.

A partir de las concentraciones en equilibrio (C_e), se calculó la capacidad de adsorción (q_e) y se ajustaron los datos experimentales a los modelos de Langmuir, Freundlich y Sips. En todos los casos se observó un incremento de q_e con el aumento de la concentración inicial, hasta alcanzar la saturación del material adsorbente a $C_e \approx 125$ mg/L, comportamiento típico de sistemas con número finito de sitios activos.

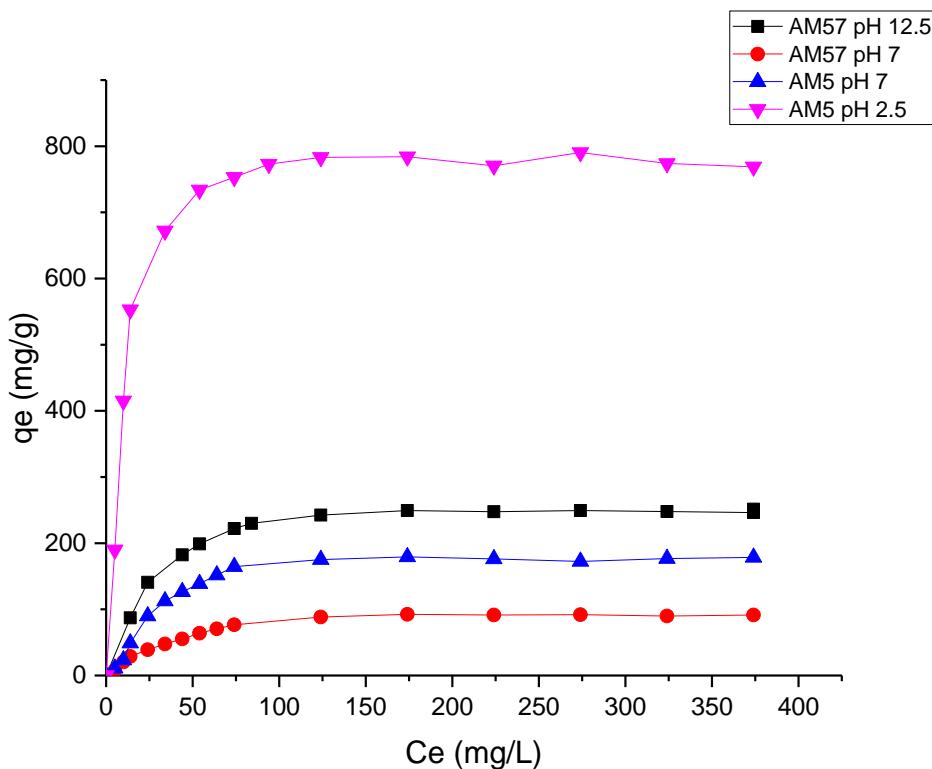


Figura 4.43 Isotermas de adsorción de los colorantes AM5 y AM57 a pH óptimo y neutro.

Tabla 4.7 Parámetros de ajuste a modelos de isoterma para películas de quitosano.

Modelo		AM57 pH 12.5	AM57 pH 7	AM5 pH 2.5	AM5 pH 7
Freundlich	K _F	82.292	15.861	333.209	35.568
	n	0.202	0.319	0.161	0.296
	R ²	0.775	0.864	0.699	0.779
Langmuir	q _m	274.296	106.024	824.891	204.419
	K _L	0.045	0.027	0.110	0.032
	R ²	0.985	0.985	0.972	0.961
Sips	q _m	265.957	102.535	810.591	193.957
	k _s	5.929	0.065	13.023	5.065
	n	90.753	1.842	82.278	92.931
	R ²	0.995	0.990	0.989	0.991

a) Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 5

Las isoterma de adsorción del AM5 se presentan en la figura 4.44. Se observó un incremento progresivo de la capacidad de adsorción con la concentración inicial, hasta alcanzar la saturación del adsorbente. La mayor capacidad se obtuvo a pH 2.5, con un valor de $q_m = 824.89$ mg/g, atribuible a la alta protonación de los grupos amino del quitosano ($-\text{NH}_2 \rightarrow -\text{NH}_3^+$), lo que genera una superficie altamente cargada positivamente.

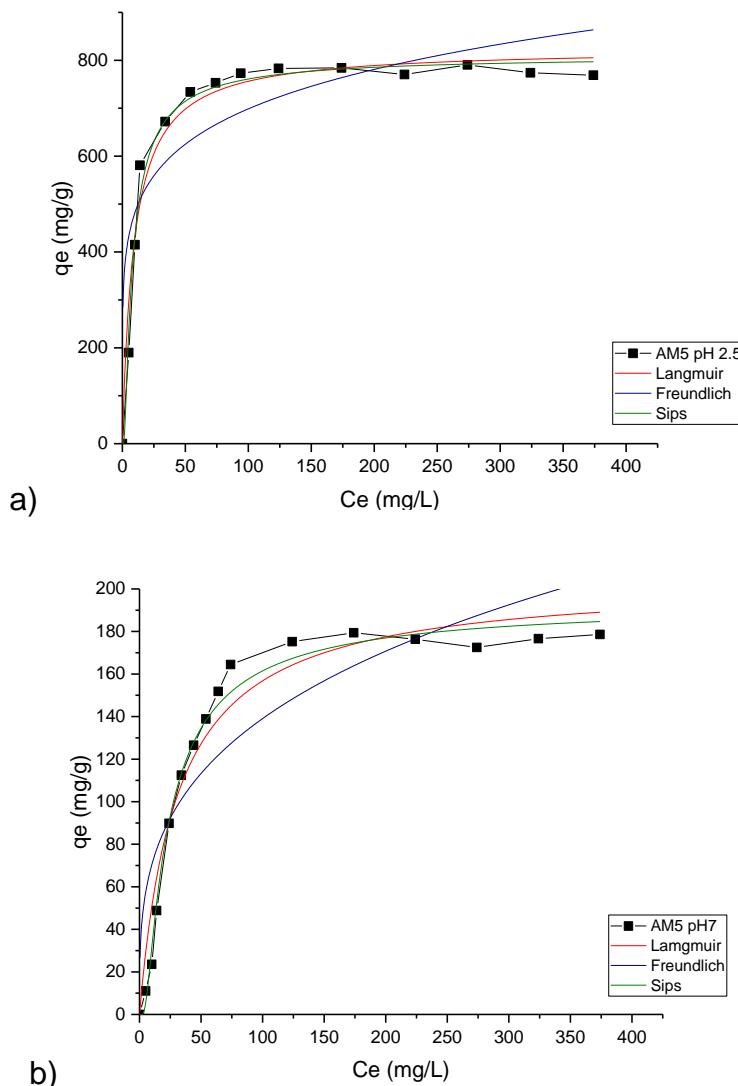


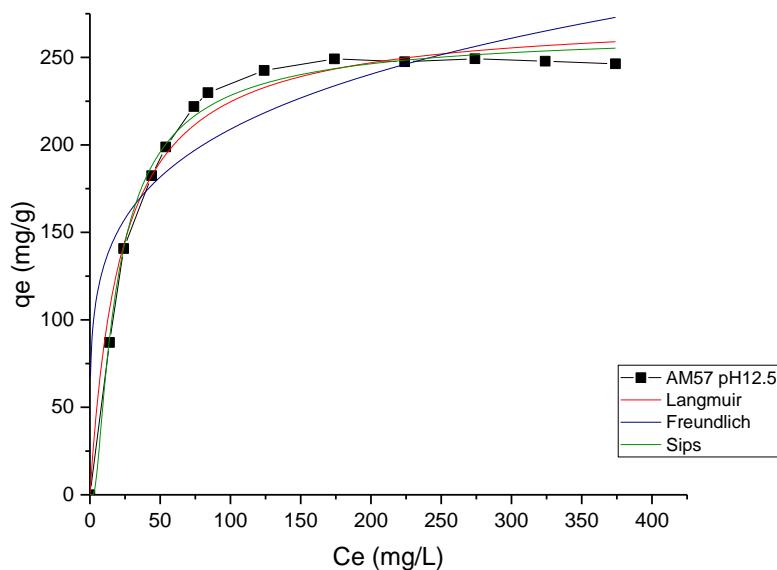
Figura 4.44 a) y b) Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 5 sobre las películas de quitosano.

Desde el punto de vista estructural, el AM5 contiene grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$), carbonilo (C=O) y enlaces azo (–N=N–), que proporcionan sitios de carga negativa y alta polaridad, favoreciendo la interacción electrostática con el quitosano protonado. El modelo de Langmuir ($R^2 = 0.973$) describe adecuadamente el sistema, indicando adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea. El modelo Sips también mostró excelente ajuste ($R^2 = 0.990$), sugiriendo una ligera heterogeneidad superficial.

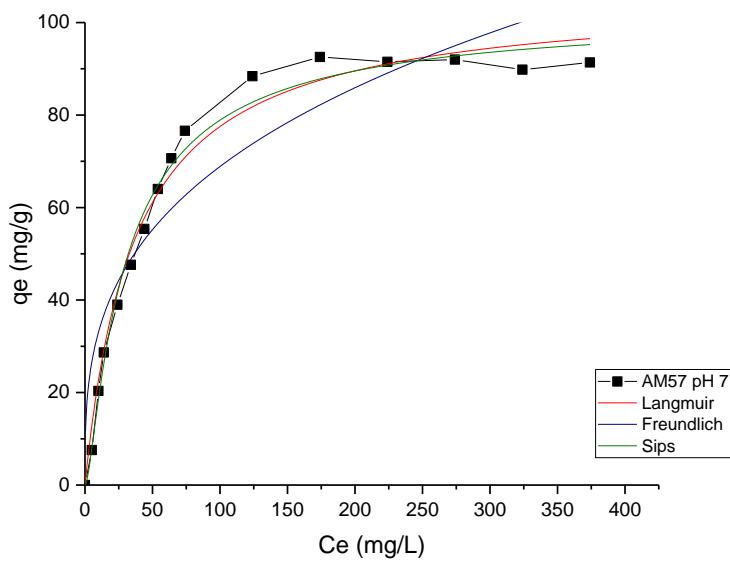
El valor bajo del exponente n en el modelo de Freundlich ($n = 0.16$) indica que el proceso es favorable a bajas concentraciones, mientras que la heterogeneidad superficial es mínima. En conjunto, estos resultados confirman que la adsorción de AM5 sobre quitosano es altamente eficiente, dependiente del pH ácido y dominada por interacciones electrostáticas.

b) Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 57

Las isotermas de adsorción del AM57 se presentan en la figura 4.45. Al igual que con AM5, se observó un incremento de q_e con la concentración inicial, alcanzando la saturación a $C_e \approx 125 \text{ mg/L}$. La mayor capacidad se obtuvo a pH 12.5, con $q_m = 274.30 \text{ mg/g}$.



a)



b)

Figura 4.45 Isotermas de adsorción del colorante Amarillo 57 sobre películas de quitosano: a) pH 12.5, b) pH 7.

El AM57 posee una estructura más compleja que el amarillo 5, con grupos carbonilo ($C=O$), carboxilato ($-COO^-$), amino cuaternario ($-N^+(CH_3)_3$) y enlaces azo ($-N=N$).

A pH alcalino, el quitosano se encuentra desprotonado ($-\text{NH}_2$), con menor carga positiva, pero se mantiene una capacidad de adsorción considerable. Esto sugiere que el mecanismo de interacción incluye puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals e interacciones hidrofóbicas entre las regiones aromáticas del colorante y la matriz del quitosano.

El modelo de Langmuir ($R^2 = 0.985$) y el modelo Sips ($R^2 = 0.995$) describen con precisión el proceso, indicando adsorción en monocapa con cierta heterogeneidad superficial. El parámetro n del modelo Sips ($n \approx 90$) sugiere la presencia de sitios de alta afinidad, posiblemente asociados a regiones estructuralmente accesibles o parcialmente cargadas. Revisiones recientes señalan que los mecanismos de adsorción en sistemas quitosano-hidrogel o quitosano-compuesto pueden involucrar no sólo atracción electrostática (importante sobre todo si hay carga positiva neta en quitosano) sino también puentes de hidrógeno, interacciones Van Der Waals y fuerzas $\pi-\pi$ cuando los tintes tienen estructuras aromáticas, como en los trabajos realizados por Ayala-Gutiérrez *et al.*, 2023; Ayala-Gutiérrez, *et al.*, 2025 y García-González, 2021.

4.5.2 Sistema binario

El estudio de las isotermas de adsorción permite comprender el tipo de interacción entre el adsorbato y el material adsorbente, así como estimar la capacidad máxima de retención de los sitios activos. En este caso, las películas a base de quitosano se evaluaron frente a los colorantes Amarillo 5 (AM5) y Amarillo 57 (AM57) en solución binaria (fig. 4.46), siguiendo lo descrito en el apartado 3.5.2 y ajustando los datos experimentales a los modelos matemáticos de Freundlich, Langmuir y Sips.

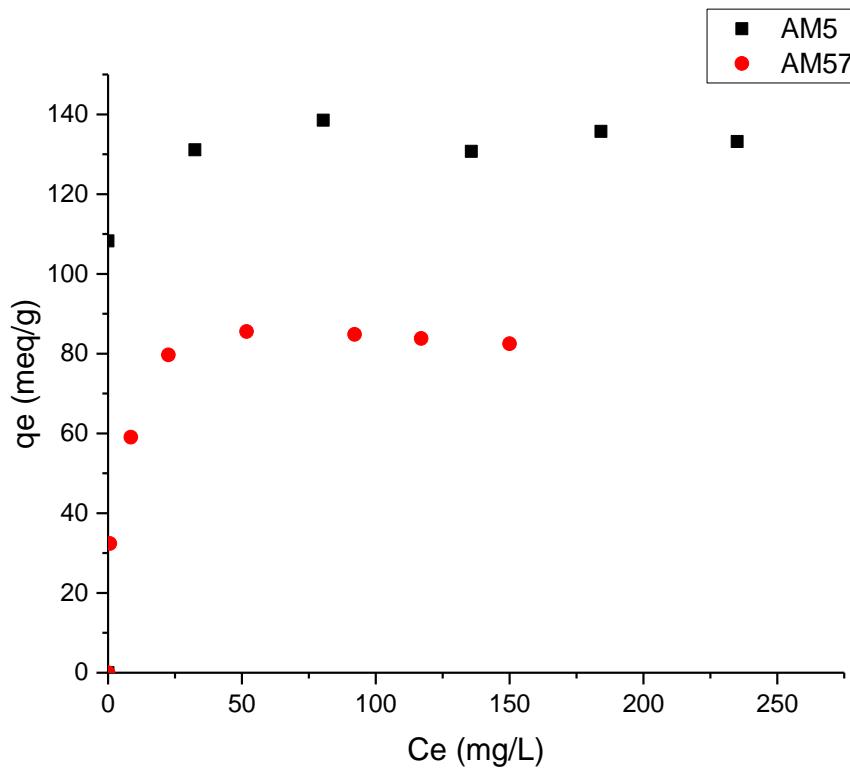


Figura 4.46 Isoterma de adsorción de sistema bicomponente AM5/AM57.

Para el colorante Amarillo 5 (AM5), el análisis de los ajustes matemáticos (fig. 4.47) mostró que el modelo de Sips presentó el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación $R^2=0.9785$, superior al de Langmuir ($R^2=0.7850$) y Freundlich ($R^2=0.9737$). Este resultado sugiere que la adsorción ocurre sobre una superficie heterogénea, con predominio de interacciones monomoleculares a bajas concentraciones y multicapas a concentraciones más elevadas. La capacidad máxima de adsorción obtenida fue de 134.91 meq/g, mientras que las constantes de Langmuir ($K_L=1.517$) y Freundlich ($K_F=130.73$) confirman la alta afinidad del colorante hacia los grupos funcionales del quitosano, particularmente los grupos amino ($-\text{NH}_2$) y los hidroxilos ($-\text{OH}$), capaces de establecer interacciones electrostáticas y puentes de hidrógeno con los grupos sulfonato del colorante.

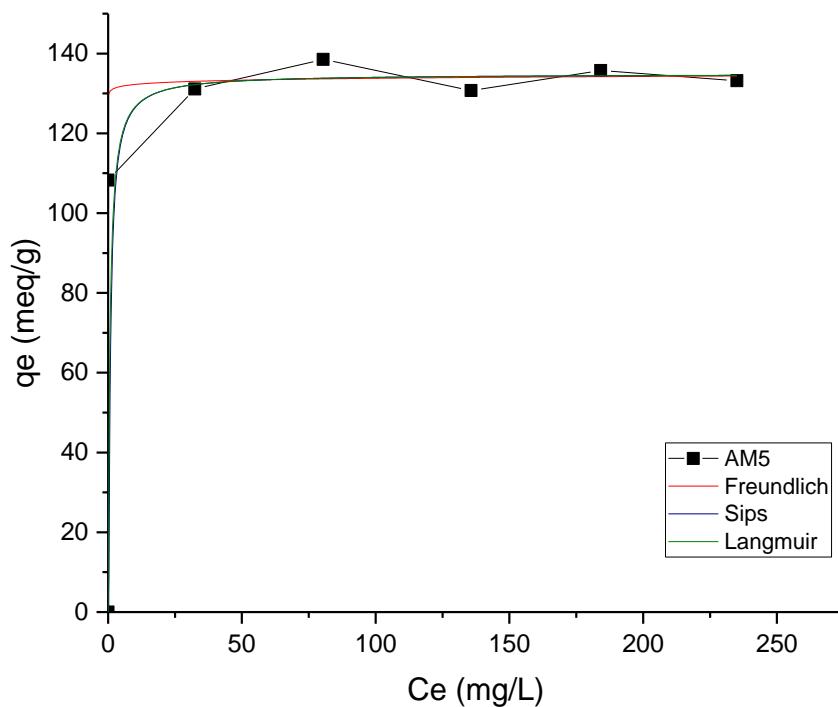


Figura 4.47 Isoterma de adsorción de la película a base de quitosano para el colorante AM5.

En el caso del Amarillo 57 (AM57), los ajustes a los modelos matemáticos (fig. 4.48, Tabla 4.8) evidenciaron una capacidad máxima de adsorción inferior ($q_m=83.64$ meq/g), lo que indica menor afinidad hacia la superficie del adsorbente. El mejor ajuste también correspondió al modelo de Sips ($R^2=0.9855$), seguido de Langmuir ($R^2=0.9693$), lo que sugiere que, aunque el proceso es favorable, existe cierta uniformidad en los sitios activos. El valor de la constante de Langmuir ($K_L=0.6789$) y el parámetro de heterogeneidad ($n=0.3381$) reflejan un proceso menos energético, probablemente debido a diferencias estructurales del colorante —como su peso molecular o la distribución de sus grupos funcionales— que limitan su interacción con la matriz polimérica.

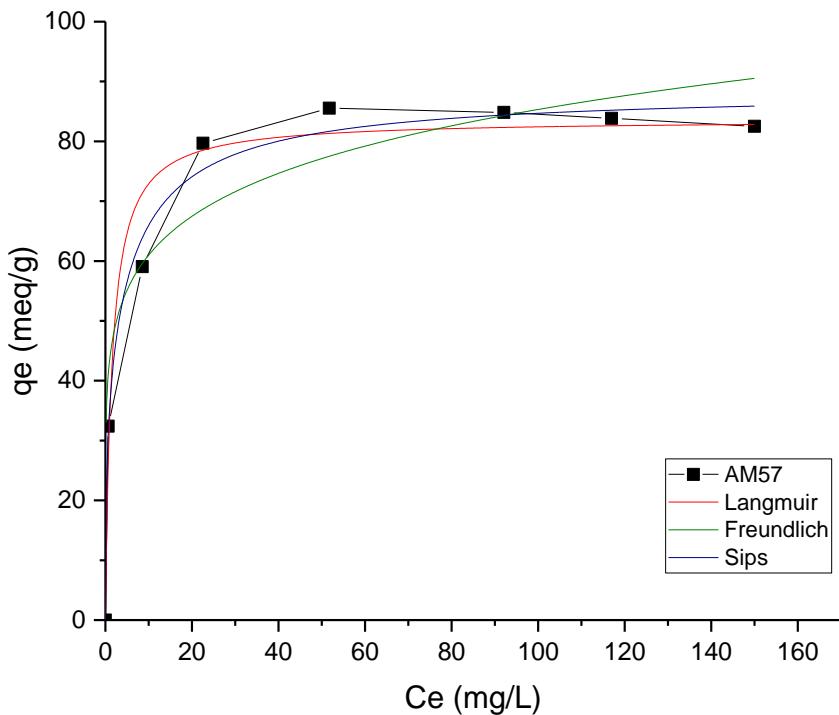


Figura 4.48 Isoterma de adsorción de la película a base de quitosano para el colorante AM57.

En el sistema binario, la competencia entre ambos colorantes por los mismos sitios activos fue evidente, observándose un predominio de la adsorción de AM5 sobre AM57. Este comportamiento se atribuye a la mayor afinidad y tamaño molecular del AM5, que le permiten ocupar preferentemente los sitios activos del adsorbente. A pesar de esta competencia, el modelo de Sips continuó mostrando el mejor ajuste para describir el equilibrio, confirmando la heterogeneidad de la superficie adsorbente y la capacidad del quitosano para interactuar simultáneamente con diferentes moléculas de colorante.

Los resultados confirman que el AM5 presenta mayor afinidad por la superficie del quitosano en comparación con el AM57 en casi todos los puntos evaluados. Los valores de q_e para AM5 oscilaron entre 52.50 y 138.53 meq/g, mientras que para AM57 se mantuvieron en un rango inferior (32.41 a 85.54 meq/g), con un único valor

máximo de 119.40 meq/g en la última concentración. Esta diferencia evidencia que la estructura química del AM5 favorece interacciones más fuertes con los grupos funcionales del quitosano.

Al analizar el q_e total del sistema binario (fig. 4.49), se observa un incremento progresivo desde 84.91 hasta 252.57 meq/g conforme aumenta la concentración de la mezcla. Esto indica que ambos colorantes son adsorbidos simultáneamente, contribuyendo de manera conjunta a la capacidad total del adsorbente. Sin embargo, los valores de AM57 no crecen en la misma proporción que los de AM5, lo que sugiere competencia por los mismos sitios activos. Este fenómeno, característico de los sistemas multicomponentes, refleja que las moléculas con mayor afinidad o mejor ajuste estérico ocupan preferentemente los sitios disponibles, desplazando parcial o totalmente a las de menor afinidad. En este caso, el predominio de AM5 confirma la adsorción selectiva del quitosano, en concordancia con los ajustes previos a los modelos de isotermas, particularmente el de Sips, que indicó una superficie heterogénea con diferentes energías de adsorción.

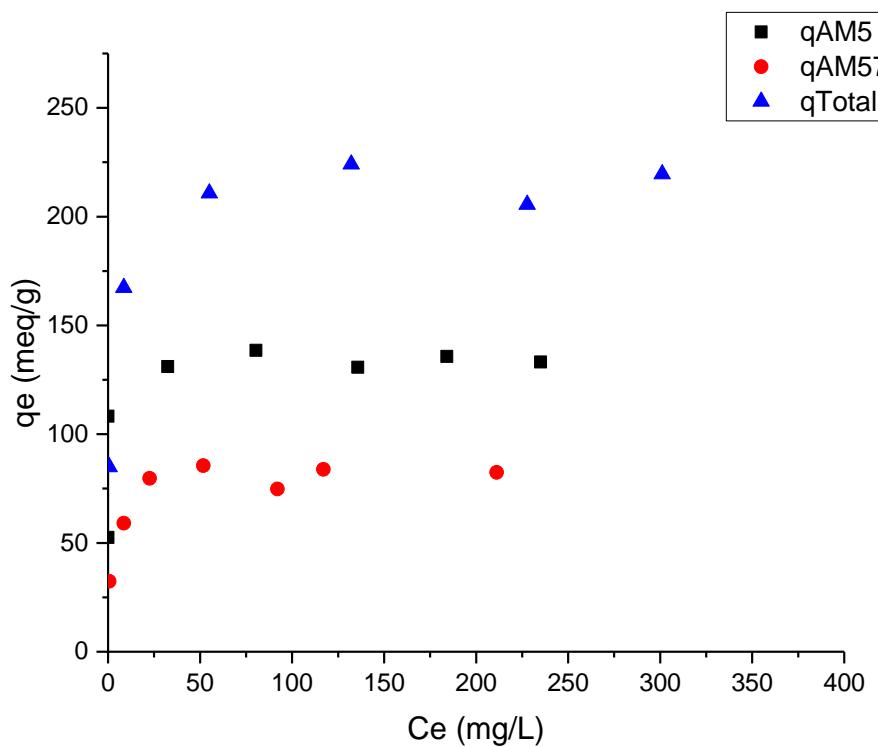


Figura 4. 19 Isoterma de adsorción de sistema bicomponente AM5/AM57, generando q_e para cada componente y una q total del sistema binario.

En conjunto, los resultados demuestran que las películas de quitosano poseen una elevada capacidad de adsorción y un marcado comportamiento selectivo en sistemas binarios, lo cual resulta altamente relevante para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales reales que contienen mezclas complejas de colorantes. La capacidad del material para retener simultáneamente ambos contaminantes, incluso bajo condiciones de competencia por los sitios activos, confirma su potencial como un adsorbente eficiente, sustentable y funcional para procesos de remediación ambiental. Asimismo, se evidenció una mayor afinidad por los colorantes de carácter aniónico, manteniendo una alta eficiencia incluso a pH neutro, condición que favorece las interacciones electrostáticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.8 Resumen de datos obtenidos de isotermas de adsorción de la película a base de quitosano para los colorantes AM5 y AM57.

Modelo		AM5 pH 7	AM57 pH 7
Freundlich	K_F	130.7357	43.58518
	n	0.00503	0.14588
	R^2	0.97376	0.85784
Langmuir	q_m	134.91365	83.63975
	K_L	1.51779	0.67887
	R^2	0.78503	0.96933
Sips	q_m	134.91618	88.48286
	k_s	96.62195	0.07232
	n	63.38937	0.33815
	R^2	0.97850	0.98553

El mejor ajuste (Tabla 4.8) al modelo de Sips sugiere que el proceso de adsorción ocurre sobre una superficie heterogénea, combinando características de los modelos de Langmuir y Freundlich, con un comportamiento transicional entre la formación de una monocapa a bajas concentraciones y la adsorción en multicapa a concentraciones más elevadas.

5 CONCLUSIONES

Se lograron sintetizar películas a base de quitosano manipulables y estables en medio ácido y básico, adecuadas para los procesos de adsorción evaluados. Por FTIR se identificaron grupos funcionales $-\text{NH}_2$ y $-\text{OH}$ como sitios activos de interacción, y se corroboró el entrecruzamiento con EGDE a través de señales características atribuibles a enlaces tipo C–O–C y amidas.

La caracterización térmica mediante TGA y DSC mostró que las películas presentan buena estabilidad térmica, con perfiles de degradación similares a los reportados en literatura. Las diferencias observadas se atribuyen al grado de acetilación, cristalinidad y peso molecular del quitosano utilizado.

La determinación teórica y experimental del pK_a de los colorantes permitió identificar las especies predominantes en función del pH. En el caso del Amarillo 5, se identificaron cinco especies, de las cuales tres interactúan activamente con el quitosano dependiendo del pH. Para el Amarillo 57, se identificaron tres especies principales, siendo una la predominante en condiciones alcalinas.

El análisis UV-Vis permitió establecer las longitudes de onda máximas de absorción: 383 nm para el Amarillo 57 y 427 nm para el Amarillo 5. Se definieron rangos lineales de cuantificación válidos para ambos colorantes, esenciales para los estudios cinéticos y de isotermas.

El cálculo de coeficientes de difusividad confirmó que la temperatura influye directamente en la movilidad de los colorantes, aumentando la difusividad conforme se incrementa la temperatura.

El pH se identificó como el factor más influyente en la adsorción. La carga superficial del quitosano cambia de positiva a negativa alrededor de pH 7.2, mientras que los colorantes presentan transiciones similares en torno a pH 9.9 (AM5) y 7.7 (AM57). Esta variación determina la afinidad electrostática entre adsorbente y adsorbato.

Las capacidades máximas de adsorción obtenidas fueron de 692.38 mg/g para AM5 a pH 2 y de 339.35 mg/g para AM57 a pH 13. Las películas de quitosano

demonstraron alta eficiencia en la adsorción de colorantes azoicos, alcanzando la saturación del material a concentraciones de equilibrio cercanas a 125 mg/L.

Los modelos de Langmuir y Sips describieron adecuadamente el comportamiento en los estudios de equilibrio de ambos colorantes, con valores de $R^2 \geq 0.97$ y ≥ 0.99 respectivamente, indicando adsorción monomolecular con ligera heterogeneidad superficial.

Los estudios cinéticos confirmaron que el modelo de pseudo segundo orden en general describe con precisión el proceso de adsorción, indicando que la etapa limitante está asociada a interacciones específicas entre los grupos funcionales del quitosano y los colorantes.

En condiciones óptimas para AM5, el medio ácido (pH 2.5) favorece la adsorción por atracción electrostática intensa entre grupos $-\text{NH}_3^+$ y $-\text{SO}_3^-$ y para el AM57, el medio alcalino (pH 12.5) favorece la adsorción por interacciones polares y enlaces secundarios con grupos desprotonados.

En el sistema binario, se observó que el AM57 se adsorbe en mayor proporción que el AM5, lo que indica una mayor afinidad competitiva hacia los sitios activos del quitosano. Sin embargo, las capacidades de adsorción individuales en sistema binario fueron menores que en sistema monocomponente, lo que evidencia la existencia de competencia por los sitios activos y la limitación de carga superficial compartida.

En conjunto, los resultados permiten concluir que las películas de quitosano entrecruzadas con EGDE son materiales adsorbentes eficientes, selectivos y versátiles, cuyo desempeño puede optimizarse mediante el control del pH del sistema y la composición del medio, siendo especialmente útiles en la remoción de colorantes azoicos en sistemas simples y mixtos.

6 FUENTES CONSULTADAS

- Ahmadijokani, F., Molavi, H., Bahi, A., Wuttke, S., Kamkar, M., Rojas, O. J., Ko, F., & Arjmand, M. (2023). Electrospun nanofibers of chitosan/polyvinyl alcohol/UiO-66/nanodiamond: Versatile adsorbents for wastewater remediation and organic dye removal. *Chemical Engineering Journal*, 457. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141176>
- Ali, M. A., Mubarak, M. F., Keshawy, M., Zayed, M. A., & Ataalla, M. (2022). Adsorption of Tartrazine anionic dye by novel fixed bed Core-Shell-polystyrene Divinylbenzene/Magnetite nanocomposite. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1335–1352. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.016>
- Alvarado-Bonifacio, A., García-Gaitán, B., Hernández-Tenorio, C., García-Rivas, J. L., Recillas-Mota, M. T., Zavala-Arce, R. E., Jiménez-Núñez, M. D. L. L., & Soriano-Aguilar, T. (2018). Modification of beads of chitosan and poly(vinyl alcohol) by means of glow discharge plasma for the adsorption of red 2 dye. *MRS Advances*, 3(63), 3869–3874. <https://doi.org/10.1557/adv.2019.97>
- Bakshi, P. S., Selvakumar, D., Kadirvelu, K., & Kumar, N. S. (2020). Chitosan as an environment friendly biomaterial – a review on recent modifications and applications. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 150, pp. 1072–1083). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.113>
- Benkhaya, S., M' rabet, S., & El Harfi, A. (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. In *Inorganic Chemistry Communications* (Vol. 115). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>
- Berradi, M., Hsissou, R., Khudhair, M., Assouag, M., Cherkaoui, O., El Bachiri, A., & El Harfi, A. (2019). Textile finishing dyes and their impact on aquatic

- environs. In *Helijon* (Vol. 5, Issue 11). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02711>
- Corrales Ramírez, L. C., & Caycedo Lozano, L. (2020). Principios físicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología Principios físicoquímicos de los colorantes. *Nova*, 18(33).
<https://doi.org/10.22490/24629448.3701>
- Gallego-Ramírez, C., Chica, E., & Rubio-Clemente, A. (2022). Coupling of Advanced Oxidation Technologies and Biochar for the Removal of Dyes in Water. *Water (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/w14162531>
- García A. (2021). “ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS DISUELtos EN AGUA CON BIOPOLÍMEROS A BASE DE QUITOSANO” [DOCTORAL]. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA.
- Geankoplis, C. J. (1998). *PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS*.
- Hartwig, A. ; C. M. ; A. M. (2021). Pigment Yellow 12, Pigment Yellow 13, Pigment Yellow 83. In *MAK Collection for Occupational Health and Safety*, 6(3), 1–35. https://doi.org/10.34865/mb635885grpd6_3or
- Huang, C., Liao, H., Ma, X., Xiao, M., Liu, X., Gong, S., Shu, X., & Zhou, X. (2021). Adsorption performance of chitosan Schiff base towards anionic dyes: Electrostatic interaction effects. *Chemical Physics Letters*, 780. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138958>
- Lai, K. C., Hiew, B. Y. Z., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., Chiu, W. S., & Khiew, P. S. (2019). Ice-templated graphene oxide/chitosan aerogel as an effective adsorbent for sequestration of metanil yellow dye. *Bioresource Technology*, 274, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.048>

- Liu, J. L., Zhou, X. M., Sun, M., Jia, A. Q., Shi, H. T., & Zhang, Q. F. (2023). A resorcinarene based chelating agent for selective cloud point extraction of Pb²⁺ ions in water: Synthesis, structural characterization and analytical applications. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(7). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104866>
- Nabor J. Balderas Gutiérrez. (2020). “SÍNTESIS DE PELÍCULAS DE QUITOSANO Y QUITOSANO-PPy EXPUESTAS A PLASMA Y SU EVALUACIÓN EN LA ELIMINACIÓN DE COLORANTES ROJO 2 Y AMARILLO 5 EN SOLUCIONES ACUOSAS” [DOCTORADO]. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA.
- Ngulube, T., Gumbo, J. R., Masindi, V., & Maity, A. (2017). An update on synthetic dyes adsorption onto clay based minerals: A state-of-art review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 191, pp. 35–57). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.031>
- Omidi, S., & Kakanejadifard, A. (2018). Eco-friendly synthesis of graphene-chitosan composite hydrogel as efficient adsorbent for Congo red. *RSC Advances*, 8(22), 12179–12189. <https://doi.org/10.1039/c8ra00510a>
- Rajendiran, R., Patchaiyappan, A., Harisingh, S., Balla, P., Paari, A., Ponnala, B., Perupogu, V., Lassi, U., & Seelam, P. K. (2022). Synergistic effects of graphene oxide grafted chitosan & decorated MnO₂ nanorods composite materials application in efficient removal of toxic industrial dyes. *Journal of Water Process Engineering*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102704>
- Skoog, D. A., Holler, Fj., & Crouch, S. R. (2018). *Principios de análisis instrumental (Sexta Edición)*. www.FreeLibros.me
- Soto, D., & Oliva, H. (2012). MÉTODOS PARA PREPARAR HIDROGELES QUÍMICOS Y FÍSICOS BASADOS EN ALMIDÓN: UNA REVISIÓN METHODS FOR PREPARATION OF CHEMICAL AND PHYSICAL

HYDROGELS BASED ON STARCH. A REVIEW. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 32(2), 154–175. www.rlmm.org

Sriram, G., Kigga, M., Uthappa, U. T., Rego, R. M., Thendral, V., Kumeria, T., Jung, H. Y., & Kurkuri, M. D. (2020). Naturally available diatomite and their surface modification for the removal of hazardous dye and metal ions: A review. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 282). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102198>

Vakili, M., Rafatullah, M., Salamatinia, B., Abdullah, A. Z., Ibrahim, M. H., Tan, K. B., Gholami, Z., & Amouzgar, P. (2014). Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: A review. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 113, pp. 115–130). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.07.007>

Vargas, G., Acevedo, J. L., López, J., & Romero, J. (2008). Study of cross-linking of gelatin by ethylene glycol diglycidyl ether. *Materials Letters*, 62(21–22), 3656–3658. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.04.020>

Vikrant, K., Giri, B. S., Raza, N., Roy, K., Kim, K. H., Rai, B. N., & Singh, R. S. (2018). Recent advancements in bioremediation of dye: Current status and challenges. In *Bioresource Technology* (Vol. 253, pp. 355–367). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.029>

Wang, W., Wang, C., Shen, J., & Li, X. (2023). Aggregate fingerprints identification based on its compositions and machine learning algorithm. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 16, Issue 7). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104810>

Worch, & Eckhard. (2012). *Eckhard Worch Adsorption Technology in Water Treatment*.

Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. In *Advances in Colloid and*

Interface Science (Vol. 209, pp. 172–184). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>

Yuan, G., Chen, X., & Li, D. (2016). Chitosan films and coatings containing essential oils: The antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems. In *Food Research International* (Vol. 89, pp. 117–128). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.004>

Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. In *Environmental Pollution* (Vol. 252, pp. 352–365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>

ANEXOS





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

OTORGA EL PRESENTE

DIPLOMA

A

JESSICA ZUBIETA AGUIRRE

POR HABER ACREDITADO

EL DIPLOMADO EN AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO, LLEVADO A CABO DEL 18 DE OCTUBRE DEL 2023 AL 04 DE FEBRERO DEL 2024, CON UNA DURACIÓN DE 120 HORAS.

CIUDAD DE MÉXICO, A 22 DE FEBRERO DE 2024.

RAMÓN JIMÉNEZ LÓPEZ
DIRECTOR GENERAL



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO

DIRECCIÓN GENERAL



Folio: vfA9UPlcQ

CERTIFICADO

OTORGADO A

Jessica Zubietá

Estrategias para escoger la revista perfecta para publicar su investigación - TecNM

19 mar. 2025

Fecha de finalización

IOP Publishing

Organizador



CERTIFICADO

OTORGADO A

Jessica Zubietta Aguirre

Introducción al arbitraje y los diferentes modelos de revisión por pares - TecNM

3 abr. 2025

Fecha de finalización

IOP Publishing

Organizador

IOP
latinoamérica



Suprema Corte
de Justicia de la Nación



Unidad General de
Conocimiento Científico
y Derechos Humanos

CASAS DE CULTURA
JURÍDICA

La Suprema Corte de Justicia de la Nación a través
de la Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos
y la Dirección General de Casas de la Cultura Jurídica

Otorga el siguiente

DIPLOMA

a:

Jessica Zubieta Aguirre

por haber cursado y aprobado el
**Diplomado Protección de la naturaleza,
cambio climático y derechos humanos, edición 2025**
transmitido en línea por la Plataforma de Actualización
Profesional e Información Jurídica de Casas de la Cultura Jurídica.
Con duración de 80 horas.

Se otorga el presente en el mes de julio de 2025, en la Ciudad de México.

Alejandra Rabasa Salinas
Titular de la Unidad General
de Conocimiento Científico
y Derechos Humanos



Rubén Medina Estrada
Director General
de Casas de la Cultura Jurídica

Código de autenticación: 5AKeLPIb4V



On Behalf of the Organizing Committee
We Acknowledges the Participation of

Jessica Zubietta Aguirre

in the

33rd International Materials Research Congress

held in Cancún Quintana Roo, Mexico

17-21 August, 2025



Dra. Cecilia Noguez Garrido
SMMater President



Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
EN EL MARCO DE SU 50 ANIVERSARIO OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

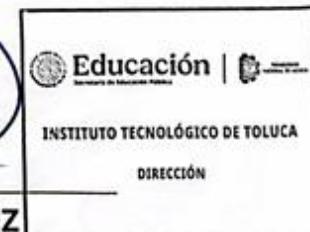
A

Jessica Zubieta Aguirre, Rosa Elvira Zavala Arce,
Alfredo García González, José Luis García Rivas,
Beatriz García Gaitán

Por su participación en el:
"Día Mundial del Agua. Desde el Corazón del TecNM:
Un Diálogo por el Agua y los Glaciares en México", con el cartel:
"Tecnología de adsorción para remoción de colorantes
en el tratamiento de aguas"
que se llevó a cabo el día 21 de marzo del presente,
en esta institución.

"Educación, integridad y ciencia"

DANIEL VILLANUEVA VÁSQUEZ
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA



METEPEC, EDO. DE MÉXICO. MARZO 2025.

