



**Somos calidad,
somos USC**

Nanopartículas de quitosano como agentes para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos en agua: Revisión sistemática

Autor

Kevin Frederic Mora Garcia

Química Farmacéutica

Director

Yhors Alexander Ciro Monsalve

**Grupo de Investigación
QUIBO**

**Línea de Investigación
Química molecular y supramolecular**

**Facultad de Ciencias Básicas
Química Farmacéutica
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026**

Nanopartículas de quitosano como agentes para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos en agua: Revisión sistemática

Kevin Frederic Mora Garcia

**Director (a)
Yhors Alexander Ciro Monsalve**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química Farmacéutica
Cali, Colombia
2026**

**Nanopartículas de quitosano como agentes para la remoción de
contaminantes emergentes farmacéuticos en agua: Revisión sistemática**

Kevin Frederic Mora Garcia

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Químico Farmacéutico**

**Director (a)
Yhors Alexander Ciro Monsalve**

Grupo de Investigación: QUIBO

Línea de Investigación (Desarrollos tecnológicos y biotecnológicos)

**ODS 6 Agua limpia y saneamiento, ODS 9, industria, innovación e
infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsables**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química Farmacéutica
Ciudad, Colombia
2026**

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Modelo CAPEX/OPEX y costo por m ³ tratado (adsorbente, regeneración, disposición) + escenarios de escalado	Empresas de tratamiento de agua, industrias farmacéuticas y de alimentos, municipios
Responsabilidad social	Plan de relacionamiento comunitario y transparencia de calidad del agua (boletines, infografías, micrositio)	Comunidades ribereñas y urbanas, asociaciones de usuarios, colegios
Científico	Base de datos FAIR (q _m , % remoción, pH, dosis, cinética) + metaanálisis y repositorio de protocolos	Grupos de investigación, universidades, centros I+D
Indicadores de Gestión	Tablero KPI: % remoción objetivo, TOC/DBO post-tratamiento, ciclos de reuso, costo/kg adsorbente, huella de carbono	Gerencias de PTAR, QA/QC, autoridades ambientales locales
Tecnológico	Prototipo TRL 4–5 de columna de lecho fijo con adsorbente magnético regenerable manual de operación	Integradores tecnológicos, startups de agua, incubadoras/aceleradoras
Técnico	SOPs validados (curvas de ruptura, regeneración NaOH/ácida, control de lixiviación metálica, pruebas en agua real)	Operadores de planta, laboratorios acreditados, equipos de mantenimiento
Ambiental	Evaluación de ciclo de vida (ACV) y estudio de ecotoxicidad/lixiviación; plan de fin de vida del material	Autoridades ambientales, ONGs, PTAR municipales
Social	Estrategia de reducción de riesgo sanitario (disminución de fármacos y presión AMR) con indicadores medibles	Población general, hospitales, sistemas de salud pública
Cultural	Kit de divulgación “agua y ciencia”: guías en lenguaje claro, cápsulas audiovisuales y jornadas de ciencia abierta	Comunidades, periodistas científicos, tomadores de decisiones

NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO COMO AGENTES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES FARMACÉUTICOS EN AGUA: REVISIÓN SISTEMÁTICA

Kevin Frederic Mora Garcia¹, Yhors Alexander Ciro Monsalve¹
(kevin.mora02@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación en Química y biotecnología, Programa de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La contaminación de ecosistemas acuáticos por antibióticos, antiinflamatorios, hormonas y pesticidas representa una amenaza creciente que los sistemas convencionales de tratamiento son incapaces de resolver eficientemente, situación que ha impulsado la búsqueda de alternativas tecnológicas más robustas. Las nanopartículas de quitosano se posicionan como una opción sostenible, respaldada por su biocompatibilidad, origen renovable y la versatilidad química de sus grupos funcionales para la modificación dirigida. Se realizó una revisión sistemática sobre la síntesis, caracterización y desempeño adsorptivo de materiales derivados de quitosano para la remoción de contaminantes emergentes en agua, consultando bases de datos internacionales para el período 2015–2025 con criterios de elegibilidad definidos. Los estudios incluyeron materiales híbridos magnéticos, mesoporosos y compósitos con MOF/MXene que mostraron altas eficiencias frente a tetraciclinas, fluoroquinolonas y β -lactámicos, así como frente a AINEs como ibuprofeno, diclofenaco y paracetamol; la remoción de hormonas y pesticidas recibió atención notoriamente menor. Las capacidades máximas reportadas superaron los 200–500 mg·g⁻¹, especialmente cuando la adsorción se complementó con funciones catalíticas o fotocatalíticas. El desempeño dependió del pH con óptimos en rangos ácido-neutros, de la dosis del adsorbente y de la fuerza iónica, siendo la presencia de Ca²⁺/Mg²⁺ un factor que redujo consistentemente la eficiencia por competencia electrostática. Las principales brechas identificadas incluyen la predominancia de ensayos batch a bajo volumen, insuficiente evidencia en columnas y curvas de ruptura, y escasa validación en matrices reales con balances de TOC y estudios de lixiviación. Los nanocompuestos de quitosano constituyen una plataforma promisorio para etapas terciarias de tratamiento, recomendándose su validación en condiciones cercanas a pH neutro, bajo mezclas multicomponente y en pilotos de lecho fijo con regeneración magnética.

Palabras clave: Adsorción; contaminantes emergentes; lecho fijo; quitosano; tratamiento terciario.

Chitosan Nanoparticles for the Removal of Emerging Pharmaceutical Contaminants from Water: A Systematic Review

ABSTRACT

The contamination of aquatic ecosystems by antibiotics, anti-inflammatories, hormones, and pesticides represents a growing threat that conventional treatment systems are unable to resolve efficiently, a situation that has driven the search for more robust technological alternatives. Chitosan nanoparticles are positioned as a sustainable option, backed by their biocompatibility, renewable origin, and the chemical versatility of their functional groups for targeted modification. A systematic review was conducted on the synthesis, characterization, and adsorptive performance of chitosan-derived materials for the removal of emerging contaminants in water, consulting international databases for the period 2015–2024 with defined eligibility criteria. The studies included magnetic hybrid materials, mesoporous materials, and MOF/MXene composites that showed high efficiencies against tetracyclines, fluoroquinolones, and β -lactams, as well as against NSAIDs such as ibuprofen, diclofenac, and paracetamol; the removal of hormones and pesticides received significantly less attention. The maximum

capacities reported exceeded 200–500 mg·g⁻¹, especially when adsorption was complemented by catalytic or photocatalytic functions. Performance depended on pH, with optimal results in acid-neutral ranges, adsorbent dosage, and ionic strength, with the presence of Ca²⁺/Mg²⁺ consistently reducing efficiency due to electrostatic competition. The main gaps identified include the predominance of low-volume batch tests, insufficient evidence in columns and breakage curves, and limited validation in real matrices with TOC balances and leaching studies. Chitosan nanocomposites are a promising platform for tertiary treatment stages, and their validation is recommended under conditions close to neutral pH, under multicomponent mixtures, and in fixed-bed pilots with magnetic regeneration.

Keywords: *Adsorption; emerging pollutants; fixed bed; chitosan; tertiary treatment.*

HIGHLIGHTS

Híbridos de quitosano (magnéticos/MOF/MXene) logran altas capacidades y remociones rápidas, especialmente cuando combinan adsorción y (foto)oxidación.

El pH ácido-neutro y la baja fuerza iónica son factores determinantes en la eficiencia de remoción; la presencia de iones divalentes como Ca²⁺ y Mg²⁺ puede disminuir el desempeño adsorbente por competencia electrostática, por lo que se requiere validar estos nanomateriales en matrices de agua reales.

La brecha principal es de escalado: hacen falta columnas, curvas de ruptura, TOC y pilotos en matrices complejas para habilitar implementación industria

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial no solo para la supervivencia de los ecosistemas y la sociedad, sino también para el desarrollo industrial, agrícola y tecnológico (Rathi et al., 2021). Sin embargo, su disponibilidad y calidad se encuentran actualmente amenazadas por una creciente variedad de contaminantes que, en muchos casos, no son eliminados de manera eficiente por los sistemas tradicionales de tratamiento (Taheran et al., 2018). Esta situación es particularmente crítica frente a los denominados contaminantes emergentes (CEs) (Bilal et al., 2019), los cuales son un grupo diverso de sustancias que incluyen productos farmacéuticos (Scaria et al., 2021), cosméticos, pesticidas, hormonas, aditivos alimentarios, nanomateriales y compuestos industriales (Sharma et al., 2019; Bhagat et al., 2020), quienes no están regulados en la mayoría de los países y que han sido detectados en aguas residuales, superficiales, subterráneas e incluso en agua potable (Noguera-Oviedo & Aga, 2016).

Los CEs representan una amenaza creciente debido a su alta persistencia, capacidad de bioacumulación y efectos tóxicos, incluso en concentraciones traza (Shahid et al., 2021). Estudios han documentado su impacto negativo sobre la fauna acuática, incluyendo alteraciones endocrinas, reproductivas, inmunológicas y comportamentales (Birch et al., 2015); en humanos, algunos compuestos se han relacionado con efectos carcinogénicos, trastornos hormonales y riesgos reproductivos (Rodríguez-Narvaez et al., 2017). A pesar de ello, la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en uso actualmente no están diseñados para remover este tipo de contaminantes, lo que permite su liberación continua al ambiente acuático (Zhu et al., 2021).

Las tecnologías avanzadas, como los procesos de oxidación avanzada, membranas de nanofiltración, ósmosis inversa y los biorreactores de membrana, han demostrado cierto grado de eficacia en la remoción de CEs (Shahid et al., 2021). Sin embargo, estas tecnologías presentan limitaciones importantes, como los altos costos de operación, el elevado consumo energético, la posible formación de subproductos tóxicos, los problemas de ensuciamiento de membranas y su baja aplicabilidad en contextos rurales o de bajos recursos. Por ello, la búsqueda de métodos alternativos que sean eficientes, sostenibles y económicamente viables se ha convertido en una prioridad en el tratamiento de aguas contaminadas con contaminantes emergentes (CEs) (Zhang et al., 2023).

Entre estas opciones, la adsorción se ha posicionado como una de las técnicas más prometedoras debido a su bajo costo, diseño simple, posibilidad de regeneración del material adsorbente y alta eficiencia en la eliminación de una amplia gama de contaminantes (Wang & Zhuang, 2022). En particular, el uso de materiales de origen natural y biodegradable, como el quitosano, ha cobrado relevancia; este biopolímero derivado de la quitina posee propiedades como biodegradabilidad, no toxicidad, alta capacidad de interacción con diversos contaminantes, y posibilidad de funcionalización química, lo que lo convierte en un candidato para la síntesis de materiales adsorbentes avanzados (Cao et al., 2022).

No obstante, el quitosano presenta ciertas limitaciones, especialmente en lo que respecta a su solubilidad en condiciones ácidas y su estabilidad estructural en medios acuosos; para superar estas restricciones, se han desarrollado múltiples estrategias de modificación y obtención de nanopartículas basadas en quitosano, incluyendo entrecruzamiento iónico, gelación, funcionalización superficial y formación de nanocompuestos con fases inorgánicas u orgánicas que mejoran su estabilidad, área superficial y desempeño adsorbente (Liu et al., 2022). Entre los compuestos empleados para potenciar estas propiedades se encuentra el ácido fítico, un compuesto natural con alta densidad de grupos fosfato, con capacidad quelante y aporte funcional en sistemas híbridos de adsorción (Ribeiro et al., 2020). La interacción del quitosano con distintos agentes funcionales, entre ellos el ácido fítico, así como con soportes magnéticos, materiales porosos y otras fases activas, ha permitido obtener nanoestructuras estables y funcionales para la remoción de contaminantes en agua (Kim et al., 2020). De hecho, diversos estudios han mostrado que estos materiales derivados de quitosano pueden presentar alta eficiencia de adsorción, estabilidad química y capacidad de reutilización, características relevantes para su aplicación en tratamiento de aguas contaminadas (Chouhan & Mandal, 2021; Yin et al., 2023).

La síntesis de nanopartículas de quitosano ha mostrado resultados prometedores en cuanto a superficie específica, dispersión coloidal y capacidad de interacción con contaminantes en solución, especialmente cuando se emplean rutas de obtención y modificación que favorecen la exposición de grupos amino e hidroxilo o incorporan componentes con funciones magnéticas, catalíticas o mesoporosas (Bansal et al., 2024; Zhang et al.,

2023). En la literatura se han reportado aplicaciones de estas nanopartículas frente a distintos contaminantes emergentes, particularmente fármacos como antibióticos y antiinflamatorios no esteroideos, y en menor proporción frente a hormonas, pesticidas y otros compuestos orgánicos de interés ambiental (Nayak et al., 2024; Han et al., 2021). Asimismo, se reconoce que la eficacia de remoción depende de variables como la composición del nanomaterial, el pH del medio, el tiempo de contacto y la presencia de interferentes, aspectos ampliamente discutidos en estudios recientes sobre adsorción de contaminantes emergentes con materiales basados en quitosano (Fang et al., 2022).

Por esta razón, la presente revisión tiene como objetivo recopilar y analizar la información científica más relevante relacionada con la síntesis, caracterización y aplicaciones de nanopartículas elaboradas a partir de quitosano para la remoción de contaminantes emergentes en agua, evaluando sus beneficios, limitaciones y potencial de desarrollo

2. METODOLOGÍA

2.1 Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda sistemática de artículos científicos relacionados con la síntesis, caracterización y aplicación de nanopartículas de quitosano para la remoción de contaminantes emergentes en agua, publicados entre los años 2015 y 2024. Las bases de datos seleccionadas para la búsqueda fueron: Scopus, ScienceDirect, PubMed, Taylor & Francis y Web of Science. Para optimizar la búsqueda, se definieron combinaciones de palabras clave relacionadas con operadores booleanos “AND” y “OR”.

2.1.1 Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Artículos científicos originales que reporten la síntesis, caracterización y/o aplicación de nanopartículas basadas en quitosano para la remoción de contaminantes emergentes en medios acuosos.
- Investigaciones publicadas entre 2015 y 2025.
- Publicaciones en idioma inglés o español, con texto completo disponible.

Criterios de exclusión:

- Artículos de revisión, resúmenes, tesis u opiniones sin datos experimentales.
- Estudios enfocados únicamente en contaminantes tradicionales (como metales pesados o nutrientes) sin relación con contaminantes emergentes.
- Publicaciones duplicadas o con información insuficiente para el análisis.

2.1.2 Proceso de selección de estudios

Una vez realizada la búsqueda, se aplicaron un proceso de cribado en tres fases:

- Eliminación de duplicados, utilizando herramientas como Rayyan.
- Revisión de títulos y resúmenes, para descartar artículos que no cumplan con los criterios definidos.
- Lectura completa de los textos seleccionados para verificar su pertinencia y calidad metodológica.

Solo se incluyeron en la revisión final aquellos estudios que cumplan con todos los criterios de inclusión, y cuya información sea útil para responder a los objetivos planteados.

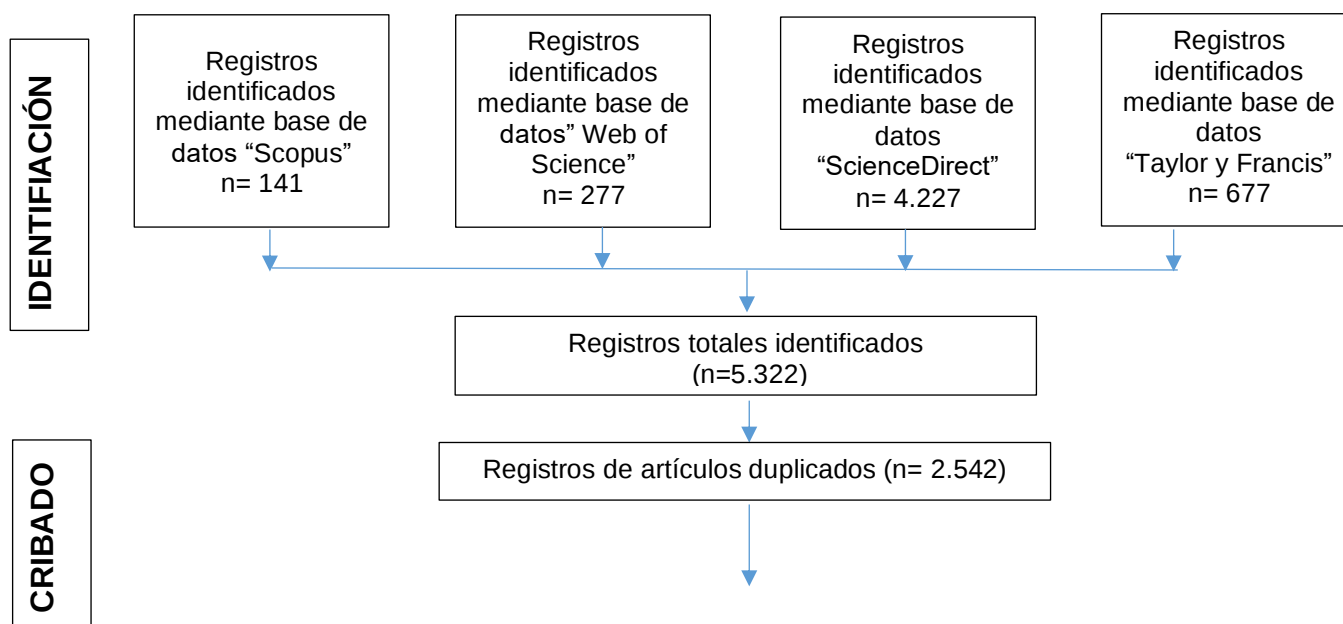
2.1.3 Extracción y análisis de datos

Se elaboró una matriz de análisis en Microsoft Excel para organizar la información de los artículos seleccionados. Esta matriz incluyó datos como:

- Autores y año de publicación
- Tipo de nanopartícula (composición, tamaño, método de síntesis y caracterización).
- Contaminantes emergentes evaluados
- Parámetros de eficiencia: capacidad de adsorción, porcentaje de remoción.
- Condiciones operativas reportadas por cada estudio, tales como pH, temperatura, tiempo de contacto, dosis del adsorbente, concentración inicial del contaminante y volumen de agua tratado, cuando estuvieran disponibles en el artículo original.
- Limitaciones señaladas por los autores y aplicaciones potenciales.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Se identificó un total de 5.322 registros mediante la búsqueda en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Taylor & Francis, como se presenta en la Figura 1. Posteriormente, se eliminaron 2.542 registros duplicados utilizando el software Rayyan, quedando 2.780 registros únicos para la fase de cribado inicial. Tras la revisión inicial y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 203 registros. De estos, 95 artículos fueron excluidos por no corresponder a estudios que evaluaran materiales basados en quitosano, por lo que 108 artículos pasaron a la fase de evaluación de elegibilidad mediante lectura de texto completo. Durante la evaluación de texto completo, se excluyeron 66 estudios adicionales por analizar compuestos, microperlas, hidrogeles u otras estructuras basadas en quitosano que no presentaban tamaño nanométrico comprobado, de acuerdo con los criterios metodológicos definidos para esta revisión. Finalmente, se incluyeron 42 artículos en la revisión sistemática, los cuales cumplieron con los criterios de elegibilidad establecidos y constituyeron la base del análisis cualitativo presentado en este trabajo.



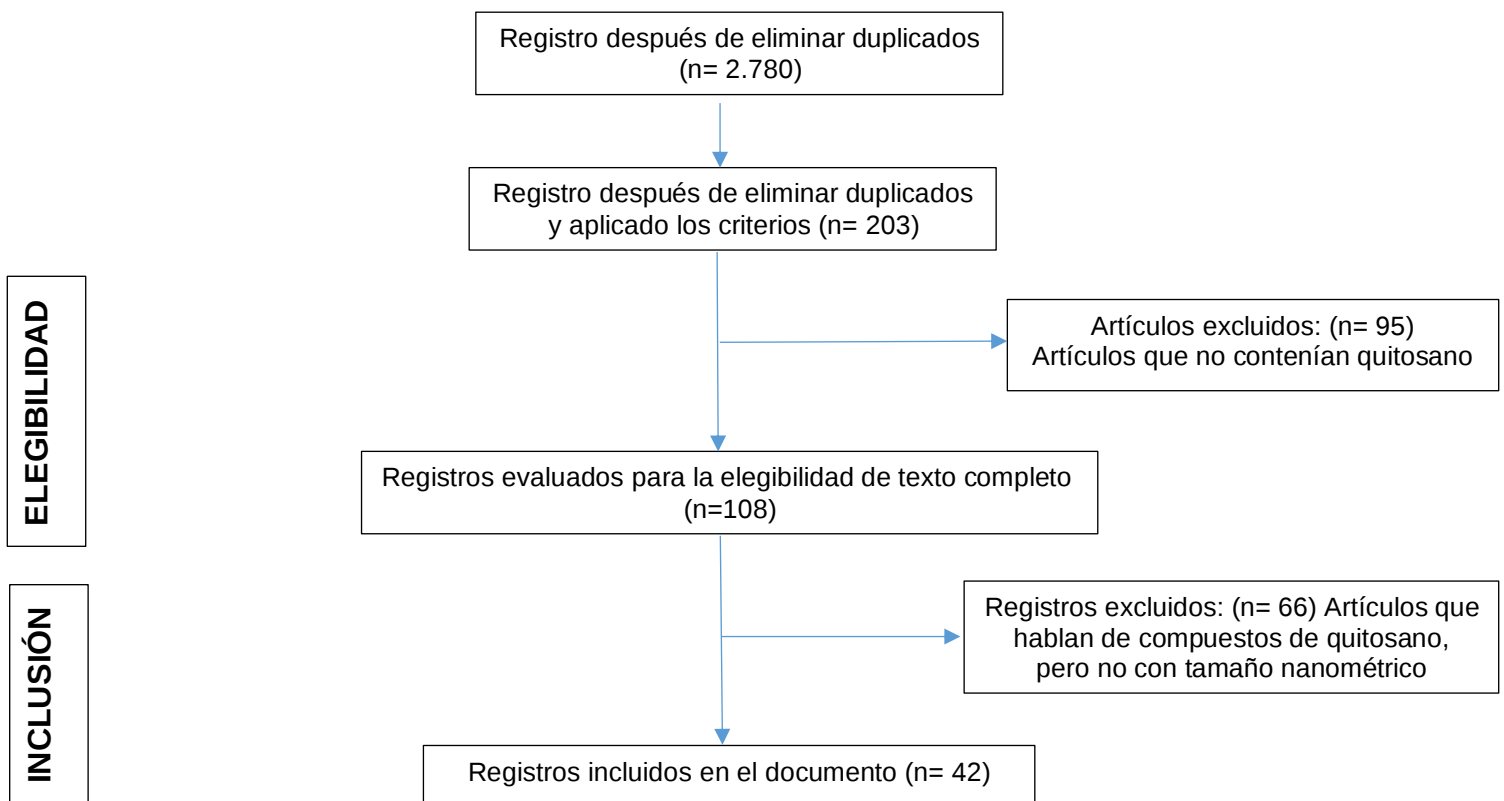


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA que ilustra la búsqueda y artículos seleccionados para el análisis

Tabla 1. Número de publicaciones encontradas en las diferentes bases de datos utilizadas.

Palabras claves	Web of Science	Scient Direct	Scopus	Taylor & Francis	
("chitosan nanoparticles" AND (pharmaceutical OR antibiotic) AND (water OR wastewater))	120	3.441	98	636	4.295
("magnetic chitosan" AND adsorption AND (diclofenac OR ibuprofen OR tetracycline))	111	253	21	11	396
("chitosan nanoparticles" AND " contaminants" AND (water OR wastewater))	46	533	22	30	631
Total por base de datos	277	4.227	141	677	5.322

Tabla 2. Evidencia científica sobre el uso de nanomateriales de quitosano en procesos de adsorción y degradación de fármacos y contaminantes orgánicos.

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Gencer Balkis et al., 2024)	2024	Nanocomposite sílice– quitosano	Diclofenac, ibuprofeno, carbamazepina	Dosis de adsorción: 0.10 g·L ⁻¹ % de remoción (pH 8.5): CBZ 89.3 %, DCF 75.3 %, IBU 87.8 %	Temp: 25°C pH: 8.5 Tiempo de contacto: 180 min Volumen de agua: 1000 L	Influencia de pH y estado de carga de superficies y de los fármacos; hidrofobicidad limitada	Remoción de farmacéuticos en matrices salina, adsorbente reutilizable y de bajo costo
(Mahmoud & Fawzy, 2023)	2023	Compósito quitosano– cáscara de nuez	Levofloxacin	Dosis de adsorbente: 0.5 g/L % remoción: 94.2 %	Temperatura: 20–25°C pH: 7 Tempo de contacto: 20 min	Dependencia de pH ; caída de desempeño en reuso; no cuantifica efecto de sales/interferentes; escala no evaluada.	Adsorbente bajo costo, tiempos cortos y regeneración ácida
(Malouchi et al., 2025)	2025	Chitosan/activated carbon@curcumin (CS/AC@Cur25 % y CS/AC@Cur50 %)	Ibuprofeno	Dosis de adsorbente: 1.0 g/L % de remoción: 98.2 %	Temperatura: 20–50 °C pH: 3 para CS/AC@Cur50 % Tiempo de contacto: 10-30 min Volumen de agua tratado: 10 mL por ensayo.	Necesidad de pH ácido (≈3) para máximo desempeño; descenso con ciclos; matriz sintética (10 mL); sin evaluación de sales/competidores ni columna	Tratamiento de aguas con ibuprofeno en pH ácido
(Shahrin et al., 2023)	2023	Quitosano	Rifampicina (RIF), estreptomicina (STM) (antibióticos) y ibuprofeno (IBU)	Dosis adsorbente: 0.50–10.0 g·L ⁻¹ % remoción a equilibrio: RIF 74.2 %, STM 46.8 %, IBU 40.3 %.	Temperatura: 20–45 °C pH: 6.7 Volumen tratado: 20 mL por ensayo	Capacidad moderada (BET bajo) vs. carbones activados/biocarbones reportados; Matriz sintética	Adsorbente económico a partir de residuo marino; posibilidades de mejora mediante modificación química
(Papageorgiou et al., 2024)	2024	Quitosano prístino y dos dervidos : polietilenimina (CS-PEI) y poliacrilamida(CS-AMI)	Carbamazepina, ciclofosfamida, adefovir, levofloxacin, metronidazol, glibenclamida, trimetoprim	Dosis de adsorbente: 1–10 g·L ⁻¹	Temperatura: 25 °C pH: 4 Tiempo de contacto: 60 min Volumen de agua tratado: 10 ml por ensayo	Ausencia de pruebas en columna o breakthrough; volúmenes pequeños y matriz sintética	Eliminación simultánea de varios fármacos en mezcla con materiales de CS modificado eficientes a pH ácido y cinéticas rápidas

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Mahato et al., 2025)	2025	CH: quitosano TC: $Ti_3C_2T_x$ MXene/quitosano. LTC: Laccase-coated MXene/quitosano MTC: MnO_2 /MXene/quitosano	Paracetamol/acetaminofén (PC) y ibuprofeno (IB)	% remoción: CH: IB 31.4 %/20.3 %; PC 31.9 %/18.1 %. TC: IB 82.8 %/73.8 %; PC 74.6 %/61.4 %. LTC: IB 98.9 %/90.6 %; PC 92.8 %/79.3 %. MTC: IB 98.4 %/88.8 %; PC 90.8 %/77.2 %	Tiempo de contacto: 20 min Volumen tratado: 50 mL por ensayo	Ensayos en volumen pequeño; No se reportan modelos de ruptura en columna y pH de operación en remoción no especificado.	Plataformas de membranas catalíticas con remoción y degradación simultánea, alta resistencia a ensuciamiento y regenerabilidad, para tratamiento avanzado de aguas residuales con fármacos
(Soares et al., 2019)	2019	Nanosorbentes magnéticos “core@shell” Fe_3O_4 revestidos con híbridos siloxano-quitina: $Fe_3O_4@SiO_2/SiTMC$ y $Fe_3O_4@SiO_2/SiCHIT$	Sulfametoxazol	Dosis $0.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	Temperatura: 25°C . Tiempo de contacto: típicamente 24 h pH: 5	Matriz sintética, %-remoción y volúmenes no cuantificados en tablas, falta de ensayos en columna/ruptura	Nanosorbente magnético eco-amigable (recuperación con imán), rápido y efectivo
(Bhatt et al., 2023)	2023	nanocompuestos de quitosano	Ofloxacina, levofloxacino, ceftriaxona	q_m OFX $378 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_m LEV $\approx 90.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_m CEF $\approx 90.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.	Temperatura Ofloxacina: $25\text{-}55^\circ\text{C}$ Temperatura Levofloxacino y ceftriaxona: $25\text{-}55^\circ\text{C}$ con pH: 2-10	Baja selectividad, baja resistencia mecánica y solubilidad en medio ácido; se recomiendan modificaciones para mejorar desempeño y estabilidad.	Uso a gran escala en remediación de aguas residuales para fármacos y otros contaminantes orgánicos/inorgánicos;
(Markeb et al., 2025)	2025	Nanocomposite $CS@nZVI\text{-}CMC$	Metales pesados y Plaguicidas clorados y fosforados	% remociones: 90 % para Cr(VI), As(V) y algunos plaguicidas clorados Dosis de adsorbente: 0.1 g/L (10 mg en 100 mL).	100 ml Tiempo: 24 h. Temperatura: 25°C . pH: 6	Selectividad dispar entre plaguicidas atribuida a grupos retiradores de electrones y polaridad, fue en agua de grifo; faltan pruebas en aguas residuales complejas y no evalúa fármacos	Tratamiento de agua potable fortificada con mezclas complejas metal+plaguicidas con eficiencias altas-moderadas;
(Muddin et al., 2024)	2024	nanopartículas de quitosano magnético	Cr(VI),	Dosis 0.01 g/L	180 min, pH 3, 25°C ,	Uso de agentes de entrecruzamiento tóxicos en algunas rutas y énfasis en metales	Biosorbente magnético para Cr(VI) y metales; recuperación magnética, posibilidad de regeneración;

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Qiao et al., 2025)	2025	Coagulante de quitosano injertado con DMDAAC	Ibuprofeno (IBU) y acetaminofén/pa racetamol	IBU 71.44 % y APAP 79.9 %	pH: 5–9 Dosis coagulante: hasta 60–80 mg/L	Modelo de agua: agua de grifo con NOM sintético + IBU/APAP; sin aguas residuales reales ni ensayos en columna o curvas de ruptura	Tratamiento combinado con PAC + coagulante CTS-DMDAAC para aguas superficiales con NOM y analgésicos (IBU/APAP), aprovechando adsorción por PAC y neutralización de carga, puenteo y barrido por CTS-DMDAAC, con mejor resistencia y recuperación de flóculos.
(Rejek et al., 2021)	2021	Compósitos TiO ₂ (P25)/quitosano (P25/CS)	Sertralina	Dosis: 0.6 g·L ⁻¹ % remoción: 86.4 %	240 min	No reporta pH, temperatura, volumen, isoterma, cinética ni regeneración/reúso.	Fotodegradación de fármacos, como sertralina, y de tintes con TiO ₂ /CS inmovilizado, lo que facilita la separación del catalizador frente a P25 en suspensión y mantiene fotoactividad equivalente.
(Moradpour et al., 2021)	2021	Compósito Cs/MCM-41-APS	Ácido acetilsalicílico	% remoción: 86 %	pH 4.6 temperatura ambiente Volumen tratado: 100 mL	Capacidad baja, Ensayos solo en agua sintética, Temperatura no controlada	Adsorbente de base biológica y de bajo costo para AAS cerca de pH 4–5; posible pretratamiento antes de etapas avanzadas; reúso factible (≥3 ciclos) con regeneración suave.
(Badawy et al., 2025)	2025	MGO-NPs y CS-MGO-NPs	Pesticidas: florasulam, metalaxyl, thiamethoxam	% de remoción (máximos observados con CS-MGO-NPs): 98.95% (florasulam), 97.67% (metalaxyl), 98.10% (thiamethoxam)	Volumen de muestra: 2 mL	En ratas se observan alteraciones hepáticas/renales y estrés oxidativo; se recomienda precaución y evaluar seguridad antes de escalar	Tratamiento de agua para remover pesticidas con CS-MGO-NPs mostrando desempeño superior a MGO-NPs; los autores recomiendan avanzar a pruebas piloto para validar viabilidad práctica
(Aouadi et al., 2024)	2024	Quitosano–ZnO NPs y quitosano–ZnO/PVP	Colorantes: azul de metileno (MB) y azul de toluidina (TB)	% quitosano–ZnO/PVP 100%; quitosano–ZnO 99.6%	Volumen: 50 mL por ensayo. Temperatura: 28 °C. pH: 3-9 tiempo de contacto 120 min	No evalúa fármacos en agua; estudio en sistema discontinuo; no reporta ensayos en columna, curvas de ruptura ni mineralización (TOC).	Remoción fotocatalítica de colorantes con materiales CS–ZnO y CS–ZnO/PVP, con mejor desempeño a pH ácido.
(Lu et al., 2025)	2025	CS-MMIPs	Ibuprofeno	Dosis de adsorción: 10 mg adsorbente en 10	pH: 5 temperatura ambiente	Enfoque en un solo fármaco (IBP); la remoción global (%) no fue tabulada	Remoción selectiva de IBP en aguas y preconcentración/detección

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
				mL de IBP (50–300 mg·L ⁻¹)			rápida por MSPE-HPLC/UV, con alta recuperación y resistencia a iones y ácidos húmicos.
(Deymeh et al., 2024)	2024	DFNS@CS@UiO-66	Doxiciclina (DOX) y tetraciclina (TTC)	Dosis de adsorción: dosis 4.0 mg·mL ⁻¹ % remoción: 85%	Temperatura ambiente; pH: 4.3; irradiación UV: 245 nm, 36–40 W; tiempo de contacto: 10 min	Concentraciones modelo muy altas en comparación de escenarios ambientales típicos	Eliminación rápida de antibióticos por adsorción y fotocátalisis con material bio-basado (CS) y alta área
(Faraji et al., 2023)	2023	Cu _{0.6} Fe _{0.4} @CRH-400	Tetraciclina (TC), ciprofloxacino (CIP), naproxeno (NPX) y paracetamol (PC)	% remoción: TC: 98.20 %, NPX: 93.90 %, CIP: 92.10 %, PC: 100 %	pH: 3 Temperatura: 35 °C Tiempo de contacto típico: hasta 70 min Volumen tratado por ensayo: No mayor de 250 mL	Ensayos en sistema discontinuo (≤250 mL); sin columnas ni curvas de ruptura; dependencia de H ₂ O ₂ y pH ácido.	Tratamiento avanzado de aguas con mezcla de fármacos usando catalizador de base biológica y magnético
(R. K. Sharma et al., 2025)	2025	(meso-sílice mediada por biosurfactante)	Ácido acetilsalicílico	Dosis de adsorbente: 0.065 g·L ⁻¹ A-BMSN-CS: hasta 92.45 % de remoción	pH: 6 Tiempo de contacto: hasta 180 min Temperatura: 25–55 °C	Ensayos en sistema discontinuo (40–50 mL), sin columna ni curvas de ruptura.	Adsorbente biomodificado con quitosano para ASA, con reúso ≥7 ciclos.
(ALothman et al., 2020)	2020	Nanopartículas compuestas de hierro–quitosano (ICNPs)	Diclofenaco sódico	% remoción: 85 %	pH 5.0 50 min, 25 °C; Volumen/escala: Erlenmeyers 50 mL	Sistema discontinuo de baja escala.	Remoción de DCF en agua a pH ≈ 5 con ICNPs económicas y separables por centrifugación; método rápido, ecoamigable y de bajo costo.
(Soares, Fernandes, Sacramento, et al., 2019)	2019	Núcleo magnético de magnetita encapsulado en sílice con quitosano cuaternario (HTCC): Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ /SiHTCC	Diclofenaco (DCF)	Capacidad máxima de adsorción (q _{max}): 240,4 mg/g Porcentaje de remoción: ~60 % Dosis: 2.0 g·L ⁻¹	pH: 6 Temperatura: 25 ± 2 °C Volumen de agua tratada 20ml	La remoción decrece cuando el pH aumenta (la superficie pierde carga positiva), por lo que el desempeño es mejor en pH ácido-neutro	El material muestra carga superficial catiónica en amplio rango de pH (ácido-neutro) y excelente desempeño magnético, por lo que puede extenderse a otras especies aniónicas y facilitar separación asistida magnéticamente en tratamiento de aguas

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Rasoulzadeh et al., 2025)	2025	Biocompósito CuO/quitosano-alginato con núcleo magnético Fe ₃ O ₄	Oxitetraciclina (OTC)	No reporta	pH 3–10, Tiempo de contacto: 10–120 min; Temperatura ambiente Volumen tratado por corrida: 50 mL.	Ensayos de laboratorio en sistema discontinuo (50 mL), con énfasis en modelado mL.	Tratamiento de aguas con antibióticos (OTC) usando biopolímeros (CS/alg) y recuperación magnética
(Yu et al., 2024)	2024	CS@PFC = <i>phenol-formaldehyde compósito fenol-formaldehído modificado con quitosano</i>	Antibióticos fluoroquinolonas (FQs) y metales pesados	% remoción: FQs: 91.8–98.6 % y metales: 85.5–96.7 %	FQs: pH óptimo 5.0 para remoción en aguas reales; T 20 °C , 30 min en 50 ml Metales: pH óptimo 8.0, T 30 °C, 90 min en 50 ml	el material es más adecuado para bajas concentraciones, pero con transferencia de masa rápida	No reporta
(Bui et al., 2023)	2023	CS-MNPs (quitosano–magnetita)	Ciprofloxacino (CFX) y Levofloxacino (LFX)	Dosis óptima seleccionada: 0.75 g·L ⁻¹ CFX 79.7 % y LFX 69.85 %	pH: 7; tiempo de contacto: 30 min; volumen tratado: 25 mL	Escala en sistema discontinuo (25 mL), sin columna ni curvas de ruptura; validación real limitada a muestras de acuicultura.	Remoción magnética y rápida de FQs en agua, con recuperación por imán, reúso tras 4 ciclos y eficacia en muestras reales.
(Danalıoğlu et al., 2018)	2018	Nanopartículas magnéticas SiO ₂ /Fe ₃ O ₄ recubiertas con quitosano	Ciprofloxacino (CPX)	Dosis CPX 10 mg·L ⁻¹	pH ≈ 5.5; temperatura: 25 °C; tiempo de contacto: 60 min	Escala de laboratorio (10 mL) en sistema discontinuo; no reporta columnas ni curvas de ruptura.	Remoción adsorptiva de ciprofloxacino con material magnético fácil de separar y desorción casi completa, lo que sugiere reutilización y recuperación del adsorbente en tratamiento de aguas con antibióticos.

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Mirizadeh et al., 2024)	2024	Biocompuestos magnéticos quitosano–microalgas–magnetita: MCC y MCA	Tetraciclina (TC), ciprofloxacino (CIP) y amoxicilina (AMX).	% remoción: TC: hasta 86.5 % (MCC) y 90.3 % (MCA) a pH ≈ 8. CIP: hasta 68.4 % (MCC) y 72.2 % (MCA) a pH ≈ 6. AMX: ≈ 57.7–61.2 % (MCA/MCC) con pH ≈ 6 dosis: 0.05–2 g L ⁻¹	50 mL de solución; agitación 130 rpm; 25°C; tiempo: 0–240 min	Escala de laboratorio en sistema discontinuo (50 mL), sin ensayos en columna ni curvas de ruptura; faltan pruebas con matrices reales complejas.	Biosorbentes magnéticos reutilizables para TC, CIP y AMX, con recuperación por imán y pérdidas mínimas tras regeneración por microondas
(Davarnejad et al., 2023)	2023	Nanopartículas de quitosano (CS-NPs)	Hormona esteroides sintética: 17α-etinilestradiol (EE2)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 5.79 mg·g ⁻¹ ; remoción (%): 92.50%; dosis de adsorbente: 1.45 g·L ⁻¹	Tiempo de contacto: 220 min; pH: 7.3; temperatura: 25 °C	Escala de laboratorio en sistema discontinuo (200 mL), sin columnas, curvas de ruptura ni evaluación de TOC/subproductos.	CS-NPs como adsorbente sencillo, económico y reutilizable para remover estrógenos en efluentes farmacéuticos/urbanos
(Ahamad et al., 2020)	2020	Nanocompuesto magnético CTM@Fe ₃ O ₄	Tetraciclina	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 215.31 mg·g ⁻¹	pH ≈ 7, 45–60 min 25 a 65 °C	Sensibilidad iónica: Ca ²⁺ reduce desempeño; el comportamiento favorable con HPO ₄ ²⁻ /SO ₄ ²⁻ sugiere mecanismos específicos que conviene validar en matrices reales complejas.	Remoción eficiente de tetraciclina en aguas residuales con material superporoso y magnético, fácil de recuperar y reutilizable; viabilidad mostrada en muestra hospitalaria real.
(Liu et al., 2019)	2019	Biocarbón modificado con quitosano–Fe/S (BCFe/S-4)	Tetraciclina	Capacidad máxima de adsorción: 223.99 mg g ⁻¹	pH: 5; temperatura: 25–45 °C; volumen tratado: 50 mL	pH óptimo ácido para BCFe/S-4 (pH 5) y sensibilidad a fuerza iónica/competidores.	Adsorbente sostenible modificado con quitosano–Fe/S, con alta q _{máx} para TC; la combinación de CS, Fe/S y la textura del biocarbón lo hace prometedor para tratamiento de aguas residuales farmacéuticas.
(Ahamad et al., 2019)	2019	CDF@MF: nanocompuesto magnético de quitosano–(difenilurea–formaldehído) con nanopartículas MnFe ₂ O ₄	Tetraciclina (TC)	Capacidad máxima: 168.42 mg·g ⁻¹	pH: 6; temperatura: 23–63 °C; volumen tratado: 30 mL; tiempo de contacto: 60 min	Sólo un antibiótico (TC) en matriz modelo; No reportado en aguas reales o mezclas complejas.	Adsorbente magnético, poroso y reutilizable para TC en efluentes farmacéuticos/urbanos, con recuperación magnética y cinética rápida

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Danalioğlu et al., 2017)	2017	MACC (Fe ₃ O ₄ /AC/quitosano)	Ciprofloxacino (CIP) Eritromicina (ERY) Amoxicilina (AMX)	Capacidad máxima de adsorción: CIP 90.10 mg g ⁻¹ , ERY 178.57 mg g ⁻¹ , AMX 526.31 mg g ⁻¹ . % remoción: CIP ~82 %, ERY ~54 %, AMX ~72 %;	Temperatura: 25 °C; sistema discontinuo: 10 mL; tiempo de contacto: 120 min; dosis inicial: 5–60 mg·L ⁻¹	pH de adsorción no controlado/No reportado	Prometedor para tratamiento de aguas, tras optimizar condiciones y explorar sistemas continuos
(Rasoulzadeh et al., 2019)	2019	Nanocompósito impreso de magnetita (Fe ₃ O ₄) recubierta con quitosano	Ciprofloxacino (CIP)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 142.85 mg·g ⁻¹ ; remoción (%) máxima: ~68%	Volumen tratado 100 mL, pH 6.5 (óptimo), dosis 1.4 g·L ⁻¹ tiempo 300 min	Matriz sintética, sin evaluación en aguas reales ni con co-contaminantes orgánicos complejos; tiempos prolongados.	Biosorbente magnético reutilizable con q _{max} alto para fluoroquinolonas, apto para efluentes con antibióticos tras validar aguas reales y sistemas continuos
(Zheng et al., 2024)	2024	Fe ₃ O ₄ @CAA (Fe ₃ O ₄ @CS-g-AM-AMPS): núcleo magnético Fe ₃ O ₄ con capa de quitosano	Tetraciclina (TCH)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 325.04 mg·g ⁻¹ ; dosis de adsorbente: 0.5 g·L ⁻¹	pH: 2–10; temperatura: 25–45 °C; volumen tratado: 200 mL	Sin columna, ni aguas reales complejas o mezclas de fármacos; regeneración ácida genera licor ácido a gestionar.	remoción magnética y reutilizable de tetraciclinas; sinergia Cu–TCH; base sólida para formulaciones en lecho fijo y validación piloto.
(Valizadeh et al., 2023)	2023	ZNF/CHT-CRD: núcleo de ZnFe ₂ O ₄ recubierto con quitosano–curdlán	Tetraciclina (TC)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 371.42 mg·g ⁻¹ 100 % remoción Dosis 0.65 g·L ⁻¹ ,	Temperatura: 10–65 °C; pH: 6; tiempo de contacto: 120 min; volumen tratado: 100 mL	sin columna, muestras reales ni TOC; mezclas de contaminantes No reportadas.	Aplicaciones potenciales: tratamiento magnético y reutilizable para tetraciclinas; candidato para escalado con pruebas en lecho fijo y matrices reales.
(Türk et al., 2025)	2025	Carbón activado derivado de quitosano (CS–AC)	Amoxicilina (AMX) y doxiciclina (DOC)	q max: 161–230 mg·g ⁻¹ Dosis 1 g·L ⁻¹ de adsorbente	Temperatura: 30 °C; pH: 3–13; tiempo de contacto: 0–30 min; volumen tratado: 200 mL	Sin columna, aguas reales, TOC/subproductos	Biosorbente regenerable y económico para antibióticos; requiere validación en mezclas y escala continua
(Kim et al., 2024)	2024	Aerogel gelatina–quitosano–UiO-66–NH ₂	Ibuprofeno (IBP) y naproxeno (NPX)	% remoción: 99.3 % (IBP), 96.4 % (NPX) q _m (Langmuir) ≈ 5.96 mg g ⁻¹ (IBP) y 7.07 mg g ⁻¹ (NPX) dosis óptima ≈0.20 g	pH 6, 25 °C, tiempo de contacto: 12 h	Sin aguas reales complejas/TOC/subproducto s; falta escala continua más exigente (	Tratamiento terciario de AINEs a traza con aerogel biopolímero–MOF de alta área, recuperable y compatible con lecho fijo.
(Vicente-Martínez et al., 2020)	2020	Fe ₃ O ₄ @AgNPs (“nanopartículas de plata modificadas con núcleo magnético”)	Ibuprofeno (IBP)	Dosis: 7 mg % remoción ≈ 93 %	10 mL, 45 min, pH 7, 25 °C	Sin quitosano; disolución > 303 K; escala de laboratorio y concentraciones bajas; q _m no visible.	remoción de AINEs tipo IBP en tratamientos terciarios a pH neutro con recuperación magnética;

Autores	Año	Tipo de nanopartícula	Contaminante	Parámetros de eficiencia	Condiciones operativas óptimas	Limitaciones	Aplicaciones potenciales
(Abukhadra et al., 2020)	2020	MCM-48/CH (sílice mesoporosa MCM-48 + gel de quitosano)	Ibuprofeno (IBP)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 510 mg·g ⁻¹ ; dosis de adsorbente: 4.00 g·L ⁻¹	Volumen tratado: 50 mL, pH: 6, 30–60 °C; tiempo de contacto: 1–24 h	Enfoque en carga/liberación farmacéutica; sin aguas reales, sin reúso ambiental ni columna.	Vehículo farmacéutico de alta capacidad y liberación controlada; para tratamiento de agua, se requieren nuevos ensayos de adsorción ambiental
(Maity & Ray, 2018)	2018	Cs-PMA/HNT: quitosano (Cs) integrado a polimetacrílico reticulado (PMA/MBA) con nanotubos de haloisita (HNT)	Pb(II) y Cd(II)	Pb 357.4 mg g ⁻¹ (89.4 %), Cd 341.6 mg g ⁻¹ (85.4 %); Dosis 0.25–1.25 g L ⁻¹	Volumen tratado: 50 mL, 30 °C, pH 6,	No evalúa fármacos; sin ensayos en columna ni aguas reales.	La arquitectura CS reticulado + inorgánico es trasladable a orgánicos/fármacos ajustando funcionalidad superficial.
(Hosseini-Bandegharai et al., 2025)	2025	FNSC-900 (Fe ₃ O ₄ /N/SePC-900):	Tetraciclina (TC)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): TC ≈ 351.4 mg g ⁻¹ . Dosis≈0.535 g·L ⁻¹	pH≈5.9, t≈14.2 min 15–30 °C. Volumen típico: 10 mL	Sin aguas reales, sin columna, volúmenes pequeños; lixiviación de Fe/Se no discutida en detalle	Tratamiento terciario para antibióticos (TC) y otros orgánicos a pH cercano a neutro, con recuperación magnética y reuso
(Al-Harthy et al., 2025)	2025	Cu/MnO ₂ /CS/GO.	Tetraciclina (TC), oxitetraciclina (OTC) y doxiciclina (DC)	Capacidad máxima de adsorción (q _{máx}): 526.3 mg·g ⁻¹ (OTC), 479.2 mg·g ⁻¹ (TC), 436.7 mg·g ⁻¹ (DC) remoción: 98.6–100% Dosis de adsorbente: 20 mg	pH 6 en 20 min. 25 °C	Falta validar en sistemas continuos y efluentes complejos con sales/competidores.	Excelente reusabilidad y recuperaciones en matrices reales (leche/miel), pero la fuerza iónica elevada disminuye la eficiencia
(Esquivel et al., 2025)	2025	Quitosano con carga catiónica permanente	TC, CIP, AMX.	% remoción: TC 75 %, CIP 75 %, AMX 60 %. Dosis: TC 35 mg, CIP 48 mg, AMX 69 mg q max: TC 632.3; CIP 185.6; AMX 420 mg·g ⁻¹	Temperatura 20–25 °C; pH 11	Matriz sintética, sin columna/ruptura; sensibilidad a sales; escala de laboratorio.	Tratamiento terciario o preconcentración de antibióticos

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización estructural y diversidad de nanopartículas basadas en quitosano

Los nanomateriales derivados de quitosano incluidos en esta revisión evidencian una amplia diversidad estructural, asociada principalmente con la capacidad de este biopolímero para actuar como matriz estabilizante, agente funcionalizante y soporte de fases inorgánicas, magnéticas o carbonosas. Esta versatilidad se relaciona con la presencia de grupos amino ($-NH_2$) e hidroxilo ($-OH$), los cuales favorecen la interacción con contaminantes farmacéuticos mediante enlaces de hidrógeno, interacciones electrostáticas, complejación superficial y, en algunos casos, interacciones hidrofóbicas o π - π cuando el quitosano se combina con materiales carbonosos o estructuras aromáticas.

Una tendencia importante observada en los estudios revisados es la incorporación de componentes magnéticos, como Fe_3O_4 , $MnFe_2O_4$ y $ZnFe_2O_4$, dentro de matrices basadas en quitosano. Esta modificación no solo mejora la recuperación del adsorbente mediante separación magnética, sino que también incrementa la estabilidad operacional y facilita su reutilización en ciclos sucesivos de adsorción-desorción. Por ejemplo, Ahamad et al. (2020) desarrollaron el nanocompuesto CTM@ Fe_3O_4 para la adsorción de tetraciclina, reportando una estructura mesoporosa con área superficial elevada y una capacidad máxima de adsorción de $215,31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. La eficiencia del material se atribuyó a la combinación entre los sitios activos del quitosano, la porosidad del sistema y la respuesta superparamagnética conferida por la magnetita.

De forma similar, Ahamad et al. (2019) sintetizaron un nanocompuesto magnético de quitosano-difenilurea-formaldehído con nanopartículas de $MnFe_2O_4$, el cual presentó una capacidad máxima de adsorción de $168,24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para tetraciclina. En este caso, la incorporación de la fase magnética permitió mejorar la recuperación del adsorbente, mientras que la matriz polimérica aportó grupos funcionales capaces de interactuar con el antibiótico. Estos resultados muestran que la magnetización de materiales basados en quitosano representa una estrategia relevante para superar una de las principales limitaciones de los adsorbentes convencionales: la dificultad de separación posterior al tratamiento.

Otra línea de desarrollo corresponde a los compósitos que combinan quitosano con carbón activado, grafeno, MOF o sílices mesoporosas. Estos materiales buscan aprovechar simultáneamente la funcionalidad química del quitosano y la alta área superficial de fases porosas o carbonosas. Danalioğlu et al. (2017), por ejemplo, reportaron un nanocompuesto Fe_3O_4 /carbón activado/quitosano con capacidades de adsorción de $90,10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para ciprofloxacino, $178,57 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para eritromicina y $526,31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para amoxicilina. Este comportamiento evidencia que la presencia de carbón activado favorece la disponibilidad de sitios de adsorción, mientras que el quitosano contribuye con grupos funcionales capaces de establecer interacciones específicas con moléculas antibióticas.

En materiales más recientes, la funcionalización del quitosano ha permitido mejorar aún más el desempeño adsorbtivo. Zheng et al. (2024) desarrollaron un adsorbente magnético funcionalizado basado en quitosano, Fe_3O_4 @CAA, con estructura núcleo-capa y capacidad máxima de adsorción de $325,04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para tetraciclina. La mejora se asoció con la presencia conjunta de grupos amino, hidroxilo y sulfónicos, los cuales aumentaron la densidad de sitios activos disponibles. Además, el estudio mostró que la presencia de ciertos iones puede modificar el proceso de adsorción: algunos cationes inorgánicos compiten con la tetraciclina, mientras que $Cu(II)$ puede actuar como puente para favorecer la formación de complejos con el contaminante.

También se identifican desarrollos basados en biocompuestos magnéticos de quitosano con otros polisacáridos. Valizadeh et al. (2023) prepararon un compósito de quitosano-curdlán magnetizado con ferrita de zinc, ZNF/CHT-CRD, para la remoción de tetraciclina. El material alcanzó una capacidad máxima de $371,42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y mantuvo cerca del 90 % de su capacidad inicial después de varios ciclos de reutilización. Este resultado es relevante porque demuestra que la combinación de biopolímeros puede aumentar la disponibilidad de grupos funcionales, mejorar la estabilidad del adsorbente y conservar su desempeño después de procesos repetidos de adsorción y regeneración.

En el caso de los antiinflamatorios no esteroideos, Kim et al. (2024) reportaron aerogeles híbridos de gelatina-quitosano-MOF funcionalizados con $UiO-66-NH_2$ para la remoción de ibuprofeno y naproxeno. El material activado térmicamente presentó alta área superficial y remociones de 99,28 % para ibuprofeno y 96,39 % para naproxeno.

Este tipo de arquitectura resulta importante porque combina una red biopolimérica con la porosidad y funcionalidad de los MOF, generando una estructura con mayor accesibilidad a sitios activos y potencial aplicación tanto en sistemas batch como en columnas de flujo continuo.

En conjunto, los estudios analizados muestran que el quitosano rara vez actúa como único componente del adsorbente; por el contrario, su mayor potencial se observa cuando se integra en plataformas híbridas, magnéticas, mesoporosas o carbonosas. Estas modificaciones permiten superar limitaciones propias del quitosano prístino, como su solubilidad parcial en medios ácidos, baja resistencia mecánica y área superficial limitada. Desde el punto de vista estructural, los materiales más prometedores son aquellos que combinan: grupos funcionales abundantes para interacción con contaminantes; porosidad suficiente para favorecer la difusión; estabilidad en agua; posibilidad de separación magnética; y capacidad de regeneración. No obstante, aunque la caracterización mediante FTIR, SEM, TEM, XRD, BET, VSM y análisis térmico confirma la formación de estos sistemas híbridos, aún persiste la necesidad de evaluar su desempeño en matrices reales, sistemas multicomponente y condiciones continuas de operación.

3.2. Eficiencia de remoción según tipo de contaminante

Antibióticos

Las tetraciclinas, fluoroquinolonas y β -lactámicos concentran la mayor parte de la evidencia disponible, siendo las tetraciclinas el grupo con más estudios y datos comparables. Las capacidades máximas de adsorción para este grupo oscilaron entre 168 y 526 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, con los valores más altos registrados en materiales magnéticos o híbridos dopados con metales redox (Ahmad et al., 2019; Al-Harthy et al., 2025). El nanocompuesto $\text{Cu}/\text{MnO}_2/\text{CS}/\text{GO}$ alcanzó remociones de 98–100% en apenas 20 minutos, resultado que refleja la sinergia entre la adsorción superficial y los procesos de oxidación mediados por las fases metálicas incorporadas (Al-Harthy et al., 2025).

En fluoroquinolonas, los trabajos de Bui et al. (2023) y Rasoulzadeh et al. (2019) sobre nanocompuestos magnéticos de Fe_3O_4 -quitosano documentaron eficiencias de eliminación de ciprofloxacino entre 68% y 79.7%, con materiales que mantuvieron su capacidad tras ciclos sucesivos de regeneración. Una variante de mayor complejidad fue propuesta por Mirzadeh et al. (2024), quienes integraron microalgas en una matriz quitosano-magnetita y obtuvieron remociones de hasta 90.3% para tetraciclina y aproximadamente 72% para ciprofloxacino, evidenciando que las matrices biológicas compuestas pueden ampliar el rango de contaminantes tratados sin comprometer la sostenibilidad del sistema.

Los β -lactámicos y macrólidos exhiben un comportamiento adsorptivo marcadamente dependiente del pH, dada la sensibilidad de su estructura molecular a las variaciones en la protonación de los grupos funcionales. Danalioğlu et al. (2017) demostraron que el material MACC ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AC}/\text{quitosano}$) puede superar los 500 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para amoxicilina, aunque la eficiencia global resultó sensible a las condiciones del medio. Esquivel et al. (2025) corroboraron esta tendencia al reportar rendimientos de 60–75% para distintos antibióticos, subrayando que la optimización del estado de protonación superficial del quitosano es un factor crítico cuando se trabaja con contaminantes de naturaleza química heterogénea.

Antiinflamatorios y analgésicos

Los AINEs y analgésicos representan el segundo grupo contaminante con mayor cobertura en la literatura revisada, con evidencia sólida para ibuprofeno, diclofenaco, naproxeno y paracetamol. Abukhadra et al. (2020) reportaron una capacidad de adsorción de 510 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para ibuprofeno mediante el nanocompuesto $\text{MCM-48}/\text{CH}$, resultado que pone de manifiesto el papel determinante de la mesoestructura porosa en la retención de moléculas farmacéuticas de tamaño intermedio. En el extremo de mayor eficiencia cinética, Mahato et al. (2025) documentaron remociones de 98.9% para ibuprofeno y 92.8% para paracetamol en 20 minutos empleando materiales $\text{MXene}/\text{quitosano}$, lo que sugiere que la velocidad del proceso no puede explicarse únicamente por adsorción pasiva y que existe una contribución catalítica activa.

Los sistemas $\text{CS}/\text{AC}/\text{Cur}$ evaluados por Malouchi et al. (2025) alcanzaron eficiencias próximas al 100% para ibuprofeno en condiciones ácidas, coherentes con la protonación de los grupos carboxilo del fármaco y la consecuente mejora en la interacción electrostática con la superficie del material. Por su parte, los aerogeles de

gelatina–quitosano–UiO-66–NH₂ estudiados por Kim et al. (2024) lograron remociones de 99.3% para ibuprofeno y 96.4% para naproxeno con buena estabilidad estructural tras ciclos repetidos, lo que refuerza la viabilidad de los MOF compósitos como adsorbentes regenerables. En matrices más complejas que contienen mezclas de AINEs, los nanocompuestos sílice–quitosano mostraron remociones de 75–89% para diclofenaco, ibuprofeno y carbamazepina simultáneamente, evidenciando una capacidad de remoción multicomponente que resulta particularmente relevante para escenarios de agua real (Gencer Balkis et al., 2024).

Metales y pesticidas

Si bien el eje central de esta revisión son los contaminantes emergentes de origen farmacéutico, un subconjunto de estudios extendió la evaluación hacia iones metálicos pesados y pesticidas, aportando evidencia adicional sobre la versatilidad química de los nanocompuestos de quitosano. Maity y Ray (2018) registraron capacidades de 357.4 mg·g⁻¹ para Pb(II) y 341.6 mg·g⁻¹ para Cd(II), valores que reflejan la afinidad de los grupos amino e hidroxilo del biopolímero por cationes de alta electronegatividad. En el ámbito de los pesticidas, Badawy et al. (2025) obtuvieron remociones cercanas al 99% para florasulam, metalaxyl y thiamethoxam mediante nanopartículas magnéticas CS-MGO, lo que sugiere que la funcionalización con óxido de grafeno amplía significativamente el espectro de contaminantes retenidos. Estos resultados deben interpretarse como evidencia complementaria al cuerpo principal de la revisión, ya que las condiciones operativas y los mecanismos predominantes difieren de los descritos para antibióticos y AINEs; no obstante, confirman que las modificaciones estructurales del quitosano permiten adaptar su química superficial a familias de contaminantes de naturaleza muy distinta.

3.3. Influencia de las condiciones operativas

Entre los parámetros que gobiernan la eficiencia de remoción, el pH ejerce una influencia determinante, debido a que modifica simultáneamente la carga superficial del adsorbente y el estado de ionización del contaminante. En los materiales basados en quitosano, los grupos amino pueden protonarse en medios ácidos o ligeramente ácidos, generando superficies con carga positiva capaces de favorecer interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno y fenómenos de complejación con diferentes contaminantes farmacéuticos. Sin embargo, este comportamiento depende de la naturaleza ácido-base de cada molécula. En el caso del diclofenaco, su pK_a cercano a 4,15 indica que en medios muy ácidos predomina principalmente en forma no ionizada, mientras que por encima de este valor, especialmente en condiciones neutras o básicas, adquiere carácter aniónico por desprotonación del grupo carboxílico. Por ello, su adsorción sobre matrices de quitosano no debe explicarse únicamente por atracción electrostática en medio ácido, sino por una combinación de mecanismos que pueden incluir enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y atracción electrostática cuando el diclofenaco se encuentra en forma aniónica. En este sentido, ALOthman et al. (2020) reportaron para diclofenaco sódico una máxima remoción cercana al 85 % a pH 5, condición en la cual el fármaco ya presenta predominio aniónico y puede interactuar favorablemente con superficies protonadas del material compuesto de quitosano-hierro. A pH básico, aunque el diclofenaco se mantiene como especie aniónica, la desprotonación progresiva de los grupos amino del quitosano puede reducir la carga positiva superficial y disminuir la contribución de la atracción electrostática, salvo en materiales funcionalizados que conserven sitios activos adicionales.

La dosis de adsorbente introduce un efecto no lineal sobre el proceso. Papageorgiou et al. (2024) trabajaron con rangos de 1 a 10 g·L⁻¹ y observaron que el incremento de dosis mejora la remoción hasta un umbral a partir del cual la saturación de sitios activos o la agregación de partículas limitan las ganancias adicionales. La temperatura, mantenida en la mayoría de estudios entre 20 y 45 °C, influyó positivamente sobre la cinética sin alterar de manera significativa la capacidad de equilibrio, comportamiento coherente con procesos en los que la difusión hacia los sitios activos es la etapa limitante (Ahmad et al., 2019; ALOthman et al., 2020). El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio varió entre 10 y 180 minutos dependiendo de la arquitectura del material, siendo notoriamente menor en adsorbentes con componentes redox, nanoarquitectura mesoporosa o funciones catalíticas integradas.

La fuerza iónica del medio representa una variable frecuentemente subestimada en estudios de laboratorio. La presencia de Ca²⁺ y Mg²⁺ redujo consistentemente la eficiencia de remoción, ya sea por competencia directa con los sitios activos o por modificación de las interacciones electrostáticas en la interfase sólido-líquido. Este fenómeno fue documentado en materiales de alta capacidad para tetraciclina y otros antibióticos, lo que pone de relieve la necesidad ineludible de validar estos adsorbentes en matrices de agua real, donde la composición iónica

y la presencia de interferentes orgánicos e inorgánicos son condiciones inherentes al sistema (Ahamad et al., 2020; Al-Harthy et al., 2025).

3.4. Mecanismos de interacción y sinergias funcionales

La remoción de contaminantes emergentes sobre nanocompuestos de quitosano no obedece a un único fenómeno superficial, sino a la actuación concurrente de adsorción electrostática, quelación mediante grupos amino e hidroxilo, interacciones π - π entre anillos aromáticos del contaminante y la matriz del adsorbente, y en materiales híbridos oxidación catalítica o fotodegradación. Los sistemas DFNS@CS@UiO-66 evaluados por Deymeh et al. (2024) y los compósitos TiO_2 /quitosano, estudiados por Rejek et al. (2021) ilustran con claridad que el acoplamiento entre adsorción y fotocatalisis no es meramente aditivo, sino que genera una sinergia que acelera sustancialmente la eliminación de contaminantes orgánicos al reducir la acumulación superficial del adsorbato. En materiales dopados con MnO_2 o Cu, se ha propuesto adicionalmente la participación de especies reactivas de oxígeno generadas en la superficie, lo que desplaza el proceso desde la simple captura hacia una degradación parcial del contaminante in situ (Mahato et al., 2025; Al-Harthy et al., 2025).

En los sistemas mesoporosos, la retención involucra también confinamiento molecular en los canales de poro, formación de puentes de hidrógeno y alta accesibilidad de la superficie interna, mecanismos que explican las elevadas capacidades registradas para ibuprofeno y tetraciclina en materiales como MCM-48/CH y FNSC-900 (Abukhadra et al., 2020; Hosseini-Bandegharaei et al., 2025). La coexistencia de estas rutas físicas y químicas, combinada con la posibilidad de recuperación magnética del adsorbente o regeneración por desorción controlada, es lo que sustenta la eficiencia sostenida de estos nanocompuestos a lo largo de ciclos sucesivos de uso.

3.5 Modelos cinéticos

El ajuste al modelo de pseudo-segundo orden (PSO) constituye el resultado cinético más recurrente en los estudios analizados, patrón que atraviesa materiales magnéticos, compósitos funcionalizados y sistemas híbridos con carbono o fases metálicas. Su predominio sugiere que la velocidad global del proceso está gobernada por la disponibilidad de sitios activos y por interacciones químicas específicas en la interfase sólido-líquido, más que por una transferencia de masa puramente física. Este comportamiento no es atribuible exclusivamente al soporte inorgánico, sino que refleja la contribución de los grupos amino e hidroxilo del quitosano a la generación de sitios de quimisorción bien definidos.

Danalioglu et al. (2017) documentaron que la adsorción de ciprofloxacino, eritromicina y amoxicilina sobre el nanocompuesto MACC se describió satisfactoriamente mediante PSO, con equilibrio alcanzado hacia los 120 min e interpretación cinética coherente con interacciones de naturaleza química superficial. Rasoulzadeh et al. (2019) llegaron a conclusiones análogas para ciprofloxacino sobre Fe_3O_4 -quitosano, aunque matizaron que la difusión intrapartícula participó como etapa secundaria, lo que descarta una cinética de sitio único y apunta hacia un proceso de múltiples pasos consecutivos.

Para las tetraciclinas, el dominio de PSO se consolida en trabajos más recientes. Zheng et al. (2024) mostraron que $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{CAA}$ ajustó mejor a PSO que a PFO, Elovich o difusión intrapartícula, resultado que los autores vincularon con la actuación simultánea de atracción electrostática y puentes de hidrógeno. Al-Harthy et al. (2025) corroboraron esta tendencia en $\text{Cu/MnO}_2/\text{CS/GO}$ para tetraciclina, oxitetraciclina y doxiciclina, con equilibrio alcanzado en cerca de 20 min, cinética que resulta consistente con un proceso de quimisorción en un sistema multisitio donde coexisten varias rutas de interacción.

Sin embargo, reducir el análisis cinético a una regla universal sería metodológicamente inadecuado. Valizadeh et al. (2023) reportaron que la adsorción de tetraciclina sobre ZNFCHT-CRD se ajustó mejor a PFO, incluso tras evaluar PSO, Elovich e IPD, lo que indica que en determinados adsorbentes la ocupación rápida de sitios superficiales puede prevalecer sobre la quimisorción gradual. ALOthman et al. (2020) encontraron para diclofenaco sódico sobre nanopartículas Fe-quitosano un mejor ajuste a PFO con control por difusión en película líquida, excepción que probablemente responde a la diferente naturaleza fisicoquímica del fármaco respecto a las tetraciclinas y fluoroquinolonas.

Un caso que merece atención crítica es el de Hosseini-Bandegharai et al. (2025): aunque PSO fue el modelo seleccionado, el modelo de Ritchie presentó ajustes igualmente competitivos para tetraciclina y azul de metileno sobre FNSC-900. Este hallazgo revela que en carbones dopados derivados de quitosano la cinética puede ser más compleja de lo que un único criterio de R^2 permite capturar, y que la interpretación fisicoquímica del proceso debe complementar y no sustituir la comparación estadística de modelos.

En suma, PSO representa la tendencia dominante en adsorbentes de quitosano para antibióticos, particularmente en materiales funcionalizados o con fases magnéticas y carbonosas activas. Las excepciones documentadas, lejos de debilitar esta conclusión, ponen de relieve que la cinética de adsorción es sensible a la arquitectura del material, a la naturaleza química del contaminante y al mecanismo de interacción predominante, variables que deben considerarse de forma integrada al interpretar los resultados.

3.6 Modelos de adsorción

El modelo de Langmuir fue el descriptor de equilibrio más frecuentemente reportado en los estudios analizados, tendencia que se reproduce en materiales magnéticos, nanocompuestos con carbono, ferritas y sistemas modificados con metales. Su recurrencia indica que la funcionalización del quitosano tiende a generar superficies con sitios activos energéticamente equivalentes y bien definidos, condición que favorece una adsorción en monocapa antes que una distribución heterogénea de energías de enlace. Lejos de ser una coincidencia estadística, este patrón refleja que las modificaciones estructurales introducidas en el biopolímero orientan la química superficial hacia un régimen de saturación progresiva y reproducible.

El trabajo de Danalioğlu et al. (2017) con el nanocompuesto MACC ilustra, sin embargo, la necesidad de una lectura crítica de los datos. Las capacidades teóricas obtenidas fueron 90.10 mg/g para ciprofloxacino, 178.57 mg/g para eritromicina y 526.31 mg/g para amoxicilina bajo Langmuir; no obstante, los datos tabulados en el mismo artículo revelan que para ciprofloxacino el ajuste de Freundlich superó al de Langmuir en términos de R^2 , circunstancia que los autores no discutieron con suficiente profundidad y que obliga a no reproducir la conclusión del resumen sin contrastarla con la información primaria.

En estudios más recientes sobre tetraciclinas, la superioridad de Langmuir se sostiene con mayor solidez experimental. Zheng et al. (2024) reportaron que $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{CAA}$ siguió este modelo con capacidades máximas de 269.25, 289.46 y 325.04 mg/g a temperaturas crecientes, lo que además evidenció el carácter endotérmico del proceso. Valizadeh et al. (2023) obtuvieron resultados concordantes para ZNFCHT-CRD, con una capacidad máxima de 371.42 mg/g a 328 K, interpretada como indicativa de una superficie con sitios de adsorción energéticamente homogéneos. Esta consistencia entre materiales de composición diferente sugiere que la presencia del quitosano como fase orgánica estructurante contribuye a regularizar la distribución superficial de sitios activos.

En adsorbentes de mayor complejidad, el predominio de Langmuir se confirma. Hosseini-Bandegharai et al. (2025) evaluaron ocho modelos de isoterma para FNSC-900 y encontraron que Langmuir fue el más adecuado entre los modelos de dos parámetros, con una capacidad máxima de 351.43 mg/g para tetraciclina a 298 K. Al-Harthy et al. (2025) reportaron para $\text{Cu/MnO}_2/\text{CS/GO}$ capacidades de 526.3, 479.2 y 436.7 mg/g para OTC, TC y DC respectivamente, con mejor ajuste a Langmuir frente a Freundlich y Temkin, lo que posiciona a este material entre los de mayor desempeño reportados en la literatura reciente para tetraciclinas.

La excepción más relevante proviene de Rasoulzadeh et al. (2019), quienes describieron la adsorción de ciprofloxacino sobre Fe-CS mediante Freundlich con $R^2 = 0.995$, atribuyendo el resultado a una superficie heterogénea con distribución no uniforme de energías de adsorción y posible formación de multicapa. Este hallazgo es significativo porque demuestra que, incluso dentro de la familia de adsorbentes magnéticos a base de quitosano, la homogeneidad superficial no puede asumirse a priori y depende tanto de la ruta de síntesis como de la naturaleza fisicoquímica del contaminante. La modificación química del biopolímero puede orientar el sistema hacia un comportamiento tipo monocapa, pero esa transición no es universal ni predecible sin caracterización detallada de la superficie.

3.7 Mecanismo de adsorción

La remoción de antibióticos sobre nanocompuestos de quitosano responde a la actuación concurrente de múltiples interacciones fisicoquímicas, cuya contribución relativa varía según la arquitectura del material y la especiación del contaminante en el medio. La atracción electrostática, los puentes de hidrógeno, la quelación con centros metálicos y las interacciones π - π constituyen los fenómenos más documentados, a los que se suman, en sistemas más complejos, las interacciones catión- π y el efecto mediador de metales divalentes sobre la retención del adsorbato.

El punto de partida de estas interacciones reside en la química inherente del quitosano: sus grupos amino e hidroxilo actúan como sitios donadores y aceptores de electrones, capaces de establecer enlaces con moléculas de diversa polaridad. Cuando el biopolímero se funcionaliza con fases metálicas, carbonosas o grafénicas, la densidad y diversidad de estos sitios se amplían considerablemente, lo que complejiza la interpretación mecanística pero también incrementa la eficiencia del sistema. Esta relación entre grado de funcionalización y complejidad mecanística es una constante en la literatura revisada.

El análisis más completo y experimentalmente respaldado en este punto es el de Zheng et al. (2024), quienes determinaron que la adsorción de tetraciclina sobre $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{CAA}$ estuvo gobernada por interacción electrostática y puentes de hidrógeno, con el Cu(II) actuando como agente puente mediante la formación de complejos Cu(II) -tetraciclina que potenciaron la retención superficial. A diferencia de otros trabajos que infieren el mecanismo a partir del perfil de pH o del ajuste isotérmico, estos autores sustentaron sus conclusiones en análisis de FTIR y XPS pre y post adsorción, así como en experimentos con iones coexistentes, lo que otorga solidez analítica a la interpretación propuesta.

Una descripción mecanística igualmente rigurosa ofrece Al-Harthy et al. (2025) para $\text{Cu/MnO}_2/\text{CS/GO}$, donde la retención de tetraciclina, oxitetraciclina y doxiciclina se atribuyó a complejación metal-ligando con Cu, interacciones π - π con la superficie grafénica, interacciones catión- π y coordinación dependiente del pH con especies hidratadas como CuOOH y MnOOH . Este estudio evidencia que la integración del quitosano con fases metálicas y grafeno desplaza el mecanismo desde una adsorción predominantemente electrostática hacia un sistema multisitio donde cada componente del nanocompuesto aporta una ruta de interacción diferenciada.

Hosseini-Bandegharaei et al. (2025) abordaron el mecanismo desde otra perspectiva al estudiar FNSC-900, un carbón funcionalizado con nitrógeno y selenio derivado del quitosano. En este material, la adsorción de tetraciclina estuvo dominada por puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals e interacciones π - π facilitadas por la matriz carbonosa heteroatómica, lo que pone de relieve que el quitosano puede desempeñar un papel activo no solo como biopolímero adsorbente, sino como precursor de estructuras carbonosas con alta polaridad superficial y sitios activos de naturaleza química bien definida.

En adsorbentes magnéticos de configuración más convencional, el mecanismo tiende a describirse con menor resolución experimental. Rasoulzadeh et al. (2019) propusieron para Fe-CS una combinación de electrostática, hidrofobicidad, quelación, intercambio iónico y posibles interacciones donador-aceptor de electrones, con la especiación del ciprofloxacino en función del pH como variable moduladora. Valizadeh et al. (2023), en cambio, plantearon un mecanismo más acotado para ZNFCHT-CRD, centrado en atracción electrostática y puentes de hidrógeno, interpretación más simple pero internamente coherente con los datos de equilibrio y cinética reportados.

El contraste más ilustrativo lo aporta Danalioğlu et al. (2017), cuyo trabajo sobre MACC es sólido en los apartados cinético e isotérmico, pero no desarrolla la contribución específica de cada interacción molecular. Los autores vinculan el desempeño del material con los supuestos del modelo de Langmuir y la presencia simultánea de carbón activado, quitosano y Fe_3O_4 , sin profundizar en evidencia espectroscópica que diferencie el aporte de puentes de hidrógeno, electrostática o interacciones aromáticas. Esta limitación, lejos de invalidar el estudio, refleja una evolución metodológica clara en la literatura: los trabajos más recientes ya no se conforman con ajustar modelos empíricos, sino que buscan demostrar el mecanismo a escala molecular mediante herramientas analíticas complementarias.

3.8. Limitaciones y aplicaciones potenciales

Los avances documentados en esta revisión contrastan con una serie de limitaciones metodológicas que condicionan la transferencia tecnológica de estos materiales. La más extendida es la restricción de los ensayos a sistemas discontinuos de pequeño volumen generalmente entre 10 y 250 mL sin curvas de ruptura ni configuraciones en columna, lo que impide extrapolar directamente los resultados a procesos continuos de escala real (Papageorgiou et al., 2024; Bui et al., 2023; Faraji et al., 2023). A esto se suma que varios materiales requieren condiciones de pH ácido o levemente ácido para operar eficientemente, lo que implicaría etapas adicionales de ajuste y neutralización del efluente con un impacto directo sobre los costos operativos (Malouchi et al., 2025; Papageorgiou et al., 2024).

Desde una perspectiva de seguridad ambiental, la posible lixiviación de metales en sistemas que incorporan Fe, Cu, Mn o Se representa un aspecto insuficientemente abordado en la literatura revisada, al igual que la evaluación ecotoxicológica de los productos generados durante la regeneración del adsorbente bajo ciclos intensivos (Hosseini-Bandegharai et al., 2025; Vicente-Martínez et al., 2020; Badawy et al., 2025). La validación en matrices de agua real con materia orgánica natural, fuerza iónica variable y mezclas multicomponente sigue siendo escasa y constituye uno de los vacíos más críticos para demostrar la viabilidad práctica de estos materiales.

A pesar de estas restricciones, los nanocompuestos magnéticos y las nanoestructuras porosas regenerables se perfilan como opciones técnicamente viables para etapas de tratamiento terciario o pulido de efluentes farmacéuticos y urbanos, particularmente como complemento a procesos biológicos convencionales. Materiales como $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CAA}$, MXene/quitosano, $\text{CTM}@\text{Fe}_3\text{O}_4$ y MMIP-CS reúnen características atractivas para su integración en lechos fijos, sistemas de separación magnética continua o plataformas de preconcentración analítica (Lu et al., 2025; Zheng et al., 2024; Mahato et al., 2025; Ahamad et al., 2020). Su consolidación como alternativa tecnológica real dependerá, no obstante, del desarrollo de estudios piloto a mayor escala, de una evaluación ambiental integral del ciclo de vida del material y de la validación sistemática bajo condiciones operativas representativas de efluentes reales.

4. CONCLUSIONES

Los nanocompuestos de quitosano en sus distintas configuraciones híbridos magnéticos ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$, $\text{Cu}/\text{MnO}_2/\text{CS}/\text{GO}$), mesoporosos (sílices funcionalizadas y MOF-UiO-66) y arquitecturas avanzadas basadas en MXene— demostraron capacidades adsorptivas elevadas frente a antibióticos, AINEs y hormonas, con valores máximos que habitualmente superan los $200\text{--}500\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y tiempos de equilibrio de 10 a 60 min cuando la función adsorptiva se acopla a actividad catalítica o fotocatalítica. Esta diversidad estructural deja en evidencia que el desempeño no responde a una sola variable, sino a la interacción entre la naturaleza fisicoquímica del contaminante, la arquitectura del nanocompuesto y la densidad y afinidad de los sitios activos disponibles.

Las condiciones operativas ejercen un control determinante sobre la eficiencia del proceso. El rango de pH ácido-neutro ($\approx 3\text{--}6$) favorece la atracción electrostática hacia compuestos aniónicos como tetraciclinas y diclofenaco, mientras que la fuerza iónica elevada particularmente la presencia de Ca^{2+} y Mg^{2+} y la competencia con materia orgánica natural tienden a reducir la capacidad de remoción. Dosis entre 0.1 y $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ con tiempos de contacto de 10 a 180 min resultan generalmente suficientes para alcanzar el equilibrio; el acoplamiento con procesos redox tipo Fenton o fotocatálisis con TiO_2/MOF permite degradación y remoción simultáneas, acortando la cinética global del sistema.

Con todo, persisten vacíos que limitan la transferencia tecnológica de estos materiales. La literatura está dominada por ensayos discontinuos a pequeño volumen, con escasa evidencia en columnas de lecho fijo, curvas de ruptura, validación en matrices reales complejas y balances de carbono orgánico total. La ecotoxicidad de los productos de regeneración y la lixiviación de metales en híbridos multifásicos son aspectos insuficientemente abordados. Se recomienda orientar los desarrollos futuros hacia condiciones operativas cercanas a pH neutro, evaluar el comportamiento bajo mezclas multicomponente y avanzar hacia configuraciones piloto con recuperación magnética y desorción alcalina, posicionando estos materiales como unidades de pulido terciario en efluentes farmacéuticos y urbanos.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis padres por su apoyo emocional y económico, por su confianza y por acompañarme durante todo mi proceso de formación profesional. Su esfuerzo y apoyo fueron fundamentales para alcanzar este logro en mi formación profesional.

A mis seres queridos tanto los que me acompañaron en este proceso como los que ya no se encuentran presentes, pero dejaron una huella imborrable en mi vida y continúan siendo una fuente de inspiración para seguir adelante.

Expreso también mi sincero agradecimiento a mi tutor por su paciencia, orientación y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, agradezco a la Universidad Santiago de Cali y a sus docentes por los conocimientos y herramientas brindados, que contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional. Culminar esta etapa representa para mí el resultado de años de esfuerzo, aprendizaje y dedicación.

6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abukhadra, M. R., Refay, N. M., Nadeem, A., El-Sherbeeney, A. M., & Ibrahim, K. E. (2020). Insight into the role of integrated carbohydrate polymers (starch, chitosan, and β -cyclodextrin) with mesoporous silica as carriers for ibuprofen drug; equilibrium and pharmacokinetic properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 537–547. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.04.052>
- Ahamad, T., Naushad, M., Al-Shahrani, T., Al-hokbany, N., & Alshehri, S. M. (2020). Preparation of chitosan based magnetic nanocomposite for tetracycline adsorption: Kinetic and thermodynamic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 258–267. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.01.025>
- Ahamad, T., Ruksana, Chaudhary, A. A., Naushad, M., & Alshehri, S. M. (2019). Fabrication of MnFe₂O₄ nanoparticles embedded chitosan-diphenylureaformaldehyde resin for the removal of tetracycline from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 180–188. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.04.204>
- Ahmed, H. A., El-Maradny, Y. A., Shalaby, M. A., El-Menshawly, H., & Abd EL-Wahab, A. E. (2025). Isolation and characterization of Chitosan from shrimp shell waste and the sustainable preparation of salicylic acid-loaded Chitosan nanoparticles for antibiofilm applications. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-03355-3>
- Alarcón-Payán, D. A., Koyani, R. D., & Vazquez-Duhalt, R. (2017). Chitosan-based biocatalytic nanoparticles for pollutant removal from wastewater. *Enzyme and Microbial Technology*, 100, 71–78. <https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2017.02.008>
- Al-Harthy, E. A., Shaker, M. A., & Yakout, A. A. (2025). Synergetic enhancement of copper and manganese dioxide nanoparticles with the biobased chitosan-crosslinked-graphene nanocomposite for potential adsorptive remediation of tetracycline antibiotics from food samples. *Materials Today Communications*, 47, 112930. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2025.112930>
- ALothman, Z. A., Badjah, A. Y., Alharbi, O. M. L., & Ali, I. (2020). Synthesis of chitosan composite iron nanoparticles for removal of diclofenac sodium drug residue in water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 870–876. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.05.154>
- Aouadi, A., Hamada Saud, D., Rebiai, A., Achouri, A., Benabdesselam, S., Mohamed Abd El-Mordy, F., Pohl, P., Ahmad, S. F., Attia, S. M., Abulkhair, H. S., Ararem, A., & Messaoudi, M. (2024). Introducing the antibacterial and

- photocatalytic degradation potentials of biosynthesized chitosan, chitosan–ZnO, and chitosan–ZnO/PVP nanoparticles. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–29. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-65579-Z>
- Badawy, M. E. I., Taha, M. A. I., Abdel-Razik, R. K., & Abo-El-Saad, M. M. (2025). Preparation, characterization, and pesticide adsorption capacity of chitosan-magnetic graphene oxide nanoparticles with toxicological studies. *Environmental Science and Pollution Research* 2025 32:9, 32(9), 5159–5185. <https://doi.org/10.1007/S11356-025-35975-7>
- Bakshi, P. S., Selvakumar, D., Kadirvelu, K., & Kumar, N. S. (2018). Comparative study on antimicrobial activity and biocompatibility of N-selective chitosan derivatives. *Reactive and Functional Polymers*, 124, 149–155. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2018.01.016>
- Bastiani, V. R. de, Wastowski, A. D., Tejada, L. S., Volpi, G. B., Grade, B. T. L., Rosa, G. M. da, & Golombieski, J. I. (2024). Synthesis and efficiency of cationic chitosan in the physical-chemical treatment of water. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 28, e85777. <https://doi.org/10.5902/2236117085777>
- Bansal, K., Mansouri, S., Bajwa, D., Swarup, S., & Quadir, M. (2024). Synthesis of phytic acid-layered zinc oxide hybrid nanoparticles and their flame-retardant applications in polyurethane coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 21(1), 369–382. <https://doi.org/10.1007/S11998-023-00828-W/FIGURES/8>
- Bhagat, C., Kumar, M., Tyagi, V. K., & Mohapatra, P. K. (2020). Proclivities for prevalence and treatment of antibiotics in the ambient water: a review. *Npj Clean Water* 2020 3:1, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00087-x>
- Bhatt, P., Joshi, S., Urper Bayram, G. M., Khatri, P., & Simsek, H. (2023). Developments and application of chitosan-based adsorbents for wastewater treatments. *Environmental Research*, 226, 115530. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.115530>
- Bilal, M., Adeel, M., Rasheed, T., Zhao, Y., & Iqbal, H. M. N. (2019). Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation – A review. *Environment International*, 124, 336–353. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.01.011>
- Birch, G. F., Drage, D. S., Thompson, K., Eaglesham, G., & Mueller, J. F. (2015). Emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, a food additive and pesticides) in waters of Sydney estuary, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1–2), 56–66. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2015.06.038>
- Bui, Q. M., Vu, T. Q., Vuong, X. T., Nguyen, V. D., Nguyen, L. T. N., Le, H. T., Nguyen, H. T. H., & Nguyen, V. P. (2023). Removal of Fluoroquinolone Antibiotics by Chitosan–Magnetite from Aqueous: Single and Binary Adsorption. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 2396, 11(8), 2396. <https://doi.org/10.3390/PR11082396>
- Cao, S., Deng, Y., Zhang, L., & Aleahmad, M. (2022). Chitosan nanoparticles, as biological macromolecule-based drug delivery systems to improve the healing potential of artificial neural guidance channels: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 201, 569–579. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.01.017>
- Chouhan, D., & Mandal, P. (2021). Applications of chitosan and chitosan based metallic nanoparticles in agrosociences-A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166, 1554–1569. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.11.035>
- Cui, X., Dai, X., Khan, K. Y., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2016). Removal of phosphate from aqueous solution using magnesium-alginate/chitosan modified biochar microspheres derived from *Thalia dealbata*. *Bioresource Technology*, 218, 1123–1132. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.07.072>
- Danalioglu, S. T., Bayazit, Ş. S., Kerkez Kuyumcu, Ö., & Salam, M. A. (2017). Efficient removal of antibiotics by a novel magnetic adsorbent: Magnetic activated carbon/chitosan (MACC) nanocomposite. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 589–596. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2017.05.131>
- Danalioglu, S. T., Kerkez Kuyumcu, Ö., Abdel Salam, M., & Bayazit, Ş. S. (2018). Chitosan grafted SiO₂–Fe₃O₄ nanoparticles for removal of antibiotics from water. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 36661–36670. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3573-Y>
- Davarnejad, R., Sarvmeili, K., Safari, Z., & Kennedy, J. F. (2023). Estrogen adsorption from an aqueous solution on the chitosan nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 237, 124224. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.124224>
- De Roux Sumer, P., Samananda Singh, L., Debbarma, B., Binan, K., & Lyngdoh, W. (2025). Chitosan Nanoparticles: Revolutionizing Targeted Drug Delivery Systems. *Advances in Pharmacology and Pharmacy*, 13(4), 513–526. <https://doi.org/10.13189/app.2025.130404>
- Deymeh, F., Ahmadpour, A., Allahresani, A., & Arami-Niya, A. (2024). Collaborative adsorption and photocatalytic degradation of high concentration pharmaceutical pollutants in water using a novel dendritic fibrous nano-silica modified with chitosan and UiO-66. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275, 133534. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133534>

- Esquivel, S. E., Aranda, F. L., Vellojin, J. P., Pérez-Zurita, D., Montoya-Rodriguez, D., Villegas-Escobar, N., Meléndrez, M., Sánchez, J., & Palacio, D. A. (2025). Combining experimental and molecular computational approaches for enhanced removal of organic and inorganic pollutants via diafiltration using chitosan with permanent cationic charges. *International Journal of Biological Macromolecules*, 320, 145738. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.145738>
- Fang, Y., Sun, W., Li, L., & Wang, Q. (2022). Bio-based Phytic Acid/chitosan and Polycarboxylic Acid for Eco-friendly Flame Retardant and Anti-crease of Cotton Fabric. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8297–8308. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1964123>;WEBSITE:WEBSITE:TFOPB;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION
- Faraji, A. R., Ramazi Frahani, A., Bakhsi Khoramdareh, N., Gil, A., Jafari, S., Hekmatian, Z., & Shojaei, N. (2023). Cu-Fe nanoparticles decorated rice hull/chitosan@FeAl₂O₄ to boosted peroxidase-like activity for catalytic degradation of antibiotics: Kinetics and mechanistic insights. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111348. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.111348>
- Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., van de Zee, S. E. A. T. M., & Ritsema, C. J. (2015). Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2015.03.002>
- Gencer Balkis, B., Aksu, A., Ersoy Korkmaz, N., Taskin, O. S., Celen, C., & Caglar Balkis, N. (2024). Synthesis of silica-chitosan nanocomposite for the removal of pharmaceuticals from the aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22:1, 22(1), 153–168. <https://doi.org/10.1007/S13762-024-05919-8>
- Gouda, M., Khalaf, M. M., Abou Taleb, M. F., & Abd El-Lateef, H. M. (2024). Fabrication of silver nanoparticles loaded acacia gum/chitosan nanogel to coat the pipe surface for sustainable inhibiting microbial adhesion and biofilm growth in water distribution systems. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262, 130085. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.130085>
- Guimarães, J., Taveira, I., Anacleto, T. M., Enrich-Prast, A., & Abreu, F. (2024). Magnetic nanoparticles for eliminating endocrine-disrupting compounds in water treatment – a quantitative systematic analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/FENV.2024.1488895>
- Han, D., Zhao, H., Gao, L., Qin, Z., Ma, J., Han, Y., & Jiao, T. (2021). Preparation of carboxymethyl chitosan/phytic acid composite hydrogels for rapid dye adsorption in wastewater treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 628, 127355. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2021.127355>
- Hosseini-Bandegharai, A., Asghari, A., Elahimehr, Z., Nemati, F., & Rajabi, M. (2025). Chitosan-derived magnetic nitrogen/selenium-doped porous carbon: A sustainable and high-performance adsorbent for removal of organic pollutants from water and wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 40, 104526. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2025.104526>
- Jiang, Y., Abukhadra, M. R., Refay, N. M., Sharaf, M. F., El-Meligy, M. A., & Awwad, E. M. (2020). Synthesis of chitosan/MCM-48 and β -cyclodextrin/MCM-48 composites as bio-adsorbents for environmental removal of Cd²⁺ ions; kinetic and equilibrium studies. *Reactive and Functional Polymers*, 154, 104675. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2020.104675>
- Kim, J. U., Shahbaz, H. M., Lee, H., Kim, T., Yang, K., Roh, Y. H., & Park, J. (2020). Optimization of phytic acid-crosslinked chitosan microspheres for oral insulin delivery using response surface methodology. *International Journal of Pharmaceutics*, 588, 119736. <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2020.119736>
- Kim, M., Njaramba, L. K., Yoon, Y., Jang, M., & Park, C. M. (2024). Thermally-activated gelatin–chitosan–MOF hybrid aerogels for efficient removal of ibuprofen and naproxen. *Carbohydrate Polymers*, 324, 121436. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.121436>
- Liu, H., Zhu, Z., Hu, J., Lai, X., & Qu, J. (2022). Inhibition of Q235 corrosion in sodium chloride solution by chitosan derivative and its synergistic effect with ZnO. *Carbohydrate Polymers*, 296, 119936. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119936>
- Liu, J., Zhou, B., Zhang, H., Ma, J., Mu, B., & Zhang, W. (2019). A novel Biochar modified by Chitosan-Fe/S for tetracycline adsorption and studies on site energy distribution. *Bioresource Technology*, 294, 122152. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122152>
- Lu, F., Mo, H., Wan, Y., Tian, B., Wang, C., Qiao, T., Fan, W., Fan, Y., Ran, L., & Zhang, Y. (2025). Hydrophilic magnetic molecularly imprinted polymers based on chitosan for the selective removal and rapid detection of ibuprofen in environment. *Reactive and Functional Polymers*, 214, 106292. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2025.106292>
- Luo, W., Gao, S., Yan, L., Liao, X., & Shi, B. (2025). Biofouling-resistant amidoxime-functionalized chitosan membranes enable efficient uranium recovery from salt-lake water. *Journal of Membrane Science*, 735, 124608. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2025.124608>

- Mahato, P., Arshad, F., Ali, M. S., Perera, C. S., & Zou, L. (2025). Removal of pharmaceutical compounds by chitosan nanocomposite membranes with catalytic additives from wastewater. *Desalination*, 602, 118635. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2025.118635>
- Mahmoud, A. E. D., & Fawzy, M. (2023). Decontamination of levofloxacin from water using a novel chitosan–walnut shells composite: linear, nonlinear, and optimization modeling. *Applied Water Science* 2023 13:12, 13(12), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S13201-023-02045-7>
- Maity, J., & Ray, S. K. (2018). Chitosan based nano composite adsorbent—Synthesis, characterization and application for adsorption of binary mixtures of Pb(II) and Cd(II) from water. *Carbohydrate Polymers*, 182, 159–171. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.10.086>
- Malouchi, N., Tolkou, A. K., Maroulas, K. N., Kosheleva, R. I., Kostoglou, M., Katsoyiannis, I. A., & Kyzas, G. Z. (2025). Polyphenolic derivatives of chitosan as adsorbents for the removal of Ibuprofen from pharmaceutical solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 715, 136647. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2025.136647>
- Markeb, A. A., Moral-Vico, J., Sánchez, A., & Font, X. (2025). Novel nanocomposite synthesis of carboxymethyl cellulose coated to zero-valent iron supported on chitosan for simultaneous removal of heavy metals and pesticides in water: Performance and mechanism. *Results in Chemistry*, 13, 102041. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2025.102041>
- Mirzadeh, S., Solisio, C., Converti, A., & Casazza, A. A. (2024). Efficient removal of tetracycline, ciprofloxacin, and amoxicillin by novel magnetic chitosan/microalgae biocomposites. *Separation and Purification Technology*, 329, 125115. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.125115>
- Moradpour, N., Sedaghat, S., Aberoomand Azar, P., & Behzad, K. (2021). Synthesis of chitosan and amine functionalized MCM-41 nanocomposite for the removal of acetylsalicylic acid from water using central composite design. *Applied Organometallic Chemistry*, 35(8). <https://doi.org/10.1002/AOC.6277>
- Muddin, N. A. I., Badsha, M. M., Arafath, M. A., Merican, Z. M. A., & Hossain, M. S. (2024). Magnetic chitosan nanoparticles as a potential bio-sorbent for the removal of Cr(VI) from wastewater: Synthesis, environmental impact and challenges. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100449. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100449>
- Mumtaz, M., Hussain, N., Salam, S., Azam, H. M. H., Łukasik, N., Kim, T. H., Santos, J. C. S. dos, & Schmidt, J. E. (2024). Chitosan-based nanomaterials for removal of water pollutants. *Chitosan-Based Hybrid Nanomaterials*, 291–318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21891-0.00016-0>
- Nayak, R., Rai, V. K., Pradhan, D., Halder, J., Rajwar, T. K., Dash, P., Das, C., Mishra, A., Mahanty, R., Saha, I., Manoharadas, S., Kar, B., Ghosh, G., & Rath, G. (2024). Exploring the Biofilm Inhibition Potential of a Novel Phytic Acid-Crosslinked Chitosan Nanoparticle: In Vitro and In Vivo Investigations. *AAPS PharmSciTech*, 25(5), 1–14. <https://doi.org/10.1208/S12249-024-02829-3/TABLES/3>
- Noguera-Oviedo, K., & Aga, D. S. (2016). Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 242–251. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2016.04.058>
- Nguyen, H. T. T., Tran, T. N., Ha, A. C., & Huynh, P. D. (2022). Impact of Deacetylation Degree on Properties of Chitosan for Formation of Electrosprayed Nanoparticles. *Journal of Nanotechnology*, 2022(1), 2288892. <https://doi.org/10.1155/2022/2288892>
- Papageorgiou, M., Maroulas, K. N., Evgenidou, E., Bikiaris, D. N., Kyzas, G. Z., & Lambropoulou, D. A. (2024). Simultaneous Removal of Seven Pharmaceutical Compounds from a Water Mixture Using Modified Chitosan Adsorbent Materials. *Macromol*, 4(2), 304–319. <https://doi.org/10.3390/MACROMOL4020018/S1>
- Pourkodee, D., Renuka Devee, D., Pavithra, M., Muthukrishnan, R. M., Sridevi, D., Renganayaki, V., Uthra, D., & Sailatha, E. (2025). Pharmaceutical Pollution (DCF, PARA & TC) Treatment and Remediation Via AOP-enhanced HB-TiO₂ Catalyst With Antimicrobial Activity. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 2025 35:8, 35(8), 6918–6939. <https://doi.org/10.1007/S10904-025-03703-W>
- Qiao, Y., Han, X., Ren, Y., Chen, F., Sun, C., Wang, J., Yang, Z., Xu, L., Shen, X., & Liu, R. (2025). The role of graft-modified chitosan-based coagulants in pharmaceutically combined polluted water: Performance and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), 116205. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2025.116205>
- Rahman, K. T., Alam, M. N. E., & Khan, M. N. (2025). Water-borne chitosan/CuO-GO nanocomposite as an antibacterial coating for functional leather with enhanced mechanical and thermal properties. *RSC Advances*, 15(16), 12162–12178. <https://doi.org/10.1039/D5RA00225G>
- Rasoulzadeh, H., Azarpira, H., Pourakbar, M., Sheikhmohammadi, A., & Rezagholizade-shirvan, A. (2025). Machine learning framework for oxytetracycline removal using nanostructured cupric oxide supported on magnetic chitosan alginate biocomposite. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11424-w>
- Rasoulzadeh, H., Mohseni-Bandpei, A., Hosseini, M., & Safari, M. (2019). Mechanistic investigation of ciprofloxacin recovery by magnetite–imprinted chitosan nanocomposite: Isotherm, kinetic, thermodynamic and reusability

- studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 712–721. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.04.139>
- Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Show, P. L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124413. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124413>
- Rejek, M., Grzechulska-Damszel, J., Schmidt, B., Schmidt BeataSchmidt, B., Rejek, zutedupl M., & Grzechulska-Damszel JoannaGrzechulska, J. (2021). Synthesis, Characterization, and Evaluation of Degussa P25/Chitosan Composites for the Photocatalytic Removal of Sertraline and Acid Red 18 from Water. *Journal of Polymers and the Environment* 29:11, 29(11), 3660–3667. <https://doi.org/10.1007/S10924-021-02138-X>
- Ribeiro, E. F., de Barros-Alexandrino, T. T., Assis, O. B. G., Junior, A. C., Quiles, A., Hernando, I., & Nicoletti, V. R. (2020). Chitosan and crosslinked chitosan nanoparticles: Synthesis, characterization and their role as Pickering emulsifiers. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116878. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.116878>
- Rodriguez-Narvaez, O. M., Peralta-Hernandez, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala, E. R. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 323, 361–380. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.04.106>
- Rukhsar, A., Iqbal, Z. F., Khan, M. S., Zainab, S. A., Nawaz, S., Kim, T. H., Mustafa, G., & Balčiūnaitė, A. (2024). Chitosan-Based Adsorbents and Catalysts for Removal of Toxic Pollutants from Water and Wastewater. *Topics in Catalysis* 2024 68:9, 68(9), 893–915. <https://doi.org/10.1007/S11244-024-01979-9>
- Scaria, J., Gopinath, A., & Nidheesh, P. V. (2021). A versatile strategy to eliminate emerging contaminants from the aqueous environment: Heterogeneous Fenton process. *Journal of Cleaner Production*, 278, 124014. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124014>
- Shahid, M. K., Kashif, A., Fuwad, A., & Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, 442, 213993. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2021.213993>
- Sharma, B. M., Bečanová, J., Scheringer, M., Sharma, A., Bharat, G. K., Whitehead, P. G., Klánová, J., & Nizzetto, L. (2019). Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin, India. *Science of The Total Environment*, 646, 1459–1467. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.235>
- Shahrin, E. W. E. S., Narudin, N. A. H., Shahri, N. N. M., Nur, M., Lim, J. W., Bilad, M. R., Mahadi, A. H., Hobley, J., & Usman, A. (2023). A comparative study of adsorption behavior of rifampicin, streptomycin, and ibuprofen contaminants from aqueous solutions onto chitosan: Dynamic interactions, kinetics, diffusions, and mechanisms. *Emerging Contaminants*, 9(1), 100199. <https://doi.org/10.1016/J.EMCON.2022.100199>
- Sharma, A., & Garg, V. K. (2024). Synthesis of a novel CuO@GO@IR nanocomposite for the removal of tetracycline from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research* 2024 32:2, 32(2), 993–1005. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-35807-0>
- Sharma, R. K., Chen, J. S., Siddique, J. A., Dey, G., Banerjee, P., Mesina, M. T. L. A., Lin, P. Y., Wang, C. W., & Chen, C. Y. (2025). Optimization and surface functionalization of biologically synthesized mesoporous silica nanoparticles to remove ASA drug from water: Sorption and regeneration study. *Separation and Purification Technology*, 353, 128262. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2024.128262>
- Soares, S. F., Fernandes, T., Sacramento, M., Trindade, T., & Daniel-da-Silva, A. L. (2019). Magnetic quaternary chitosan hybrid nanoparticles for the efficient uptake of diclofenac from water. *Carbohydrate Polymers*, 203, 35–44. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.09.030>
- Soares, S. F., Fernandes, T., Trindade, T., & Daniel-Da-Silva, A. L. (2019). Trimethyl Chitosan/Siloxane-Hybrid Coated Fe₃O₄ Nanoparticles for the Uptake of Sulfamethoxazole from Water. *Molecules* 2019, Vol. 24, Page 1958, 24(10), 1958. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24101958>
- Song, Y., Pan, J., Chen, M., Wang, Y., Li, Z., & Ge, Y. (2022). Chitosan-modified geopolymer sub-microparticles reinforced multifunctional membrane for enhanced removal of multiple contaminants in water. *Journal of Membrane Science*, 658, 120704. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2022.120704>
- Subramani, K., Saha, R., Sivaramakrishnan, R., & Incharoensakdi, A. (2023). Novel smart fiber/metal/chitosan composite as a filter for self-detoxifying photocatalytic wastewater remediation and biomedical applications. *Environmental Research*, 236, 116815. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116815>
- Taheran, M., Naghdi, M., Brar, S. K., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2018). Emerging contaminants: Here today, there tomorrow! *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 10, 122–126. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2018.05.010>

- Türk, F. N., Arslanoğlu, H., Türk, F. N., & Arslanoğlu, H. (2025). Chitosan-Derived Porous Carbon for Efficient Adsorptive Removal of Amoxicillin and Doxycycline Antibiotics from Aqueous Systems. *Water, Air, & Soil Pollution* 2025 236:9, 236(9), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S11270-025-08223-4>
- Valizadeh, K., Bateni, A., Sojoodi, N., Raffei, R., Behrooz, A. H., & Maleki, A. (2023). Preparation and characterization of chitosan-curdan composite magnetized by zinc ferrite for efficient adsorption of tetracycline antibiotics in water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123826. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123826>
- Vicente-Martínez, Y., Caravaca, M., Soto-Meca, A., & Solana-González, R. (2020). Magnetic core-modified silver nanoparticles for ibuprofen removal: an emerging pollutant in waters. *Scientific Reports*, 10(1), 18288. <https://doi.org/10.1038/S41598-020-75223-1>
- Wang, J., & Zhuang, S. (2022). Chitosan-based materials: Preparation, modification and application. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131825. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131825>
- Yakout, A. A., Basha, M. T., Al-Raimi, D. S., Aljadaani, A. H., & Ali Zainy, F. M. (2025). Synergistic impact of Cu and MnO₂ nanoparticles in Cu/MnO₂/chitosan/graphene oxide hybrid nanocomposite for improved antibacterial activity and fast adsorption of environmentally relevant anionic and cationic dyes from industrial wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 318, 144839. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.144839>
- Yin, Q., Liu, J., Zhong, Z., Zhang, Y., Zhang, F., & Wang, M. (2023). Synthesis of phytic acid-modified chitosan and the research of the corrosion inhibition and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126905. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126905>
- Yu, Y., Li, Y., Liao, Y., Huang, X., & Huang, M. (2024). Preparation of phenol-formaldehyde composite modified with chitosan for the simultaneous removal of antibiotics and heavy metal ions in waters. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136467. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.136467>
- Zhang, Q., Sun, Y., & Liu, Y. (2023). Green synthesis of chitosan–phytic acid polymers and nanoparticles. *Industrial Crops and Products*, 199, 116747. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.116747>
- Zheng, C., Sun, K., Wu, Q., Sun, Y., & Xu, B. (2024). Adsorption of ionic contaminants from complex water matrices by versatile chitosan-based beads. *Bioresource Technology*, 411, 131332. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.131332>
- Zheng, X., Pan, C., Zheng, S., & Guo, Y. (2024). Functionalized magnetic chitosan-based adsorbent for efficient tetracycline removal: Deep investigation of adsorption behaviors and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 335, 126212. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.126212>
- Zhu, L., Jiang, C., Panthi, S., Allard, S. M., Sapkota, A. R., & Sapkota, A. (2021). Impact of high precipitation and temperature events on the distribution of emerging contaminants in surface water in the Mid-Atlantic, United States. *Science of The Total Environment*, 755, 142552. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142552>