



## Nanocompósito basado en microesferas de quitosano/CF/CN como promisorio inactivador de *Escherichia coli*

### Resumen

La presente investigación plantea la producción de un material compuesto basado en las nanohojas de nitruro de carbono grafitico (g-CN) recubiertas con nanopartículas de ferrita de cobalto,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (CF), y embebidas en quitosano entrecruzado, con la finalidad de aplicarlo en procesos de inactivación fotocatalítica de cuerpos de agua contaminados con bacterias, así como en la degradación oxidativa de ibuprofeno, utilizando una fuente de radiación de 400 nm y 10 W.

El g-CN fue obtenido por descomposición térmica de melamina o urea y la CF a partir de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en medio alcalino y en presencia de g-CN. El material obtenido fue dispersado en solución acética de quitosano y se formaron perlas por goteo sobre solución de NaOH 2M. Los materiales sintetizados fueron caracterizados por difracción de Rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM).

El compuesto final (quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>) alcanzó un valor cercano al 51% de eficiencia de degradación fotocatalítica oxidativa de ibuprofeno en solución acuosa. En cuanto a las pruebas de inactivación bacteriana de *Escherichia coli*, se alcanzó una disminución de hasta dos órdenes de magnitud, correspondiente a un 21% al final del proceso fotocatalítico.

**Palabras clave:** nanocompuestos; quitosano; ferrita de cobalto; nitruro de carbono; fotocatalisis; inactivación bacteriana.

## Nanocomposite based on chitosan/CF/CN beads as a promising inactivator of *Escherichia coli*

### Abstract

This research proposes the production of a composite material consisting of nanosheets of graphitic carbon nitride (g-CN) coated with cobalt ferrite nanoparticles (CF) and embedded in cross-linked chitosan. The aim of the work was to apply this material in photocatalytic inactivation processes of water bodies polluted with bacteria, as well as in the oxidative degradation of ibuprofen, using a 400 nm and 10 W radiation source.

The g-CN was obtained through the thermal decomposition of melamine or urea, and CF was produced from  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  in an alkaline medium in the presence of g-CN nanosheets. The resulting material was dispersed in an acetic chitosan solution, forming beads by dripping the mixture onto 2M NaOH solution. The synthesized materials were characterized using X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).

The final composite (chitosan/1CF5g-CN<sub>m</sub>) achieved a yield close to 51% for the oxidative photocatalytic degradation efficiency of ibuprofen in aqueous solution. Regarding bacterial inactivation tests of *Escherichia coli*, a reduction of up to two orders of magnitude, corresponding to 21% at the end of the photocatalytic process, was attained.

**Keywords:** nanocomposites; chitosan; cobalt ferrite; carbon nitride; photocatalysis; bacterial inactivation.

## Nanocompósito baseado em microesferas de quitosana/CF/CN como um promissor inativador de *Escherichia coli*

### Resumo

A presente pesquisa propõe a produção de um material composto baseado em nanofolhas de carbono grafitico (g-CN) revestidas com nanopartículas de ferrita de cobalto,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (CF), e incorporadas em quitosano reticulado, com o objetivo de aplicá-lo em processos de inativação fotocatalítica de corpos d'água contaminados com bactérias, assim como na degradação oxidativa de ibuprofeno, utilizando uma fonte de radiação de 400 nm e 10 W.

O g-CN foi obtido por decomposição térmica de melamina ou ureia, e a CF a partir de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  em meio alcalino na presença de g-CN. O material obtido foi disperso em solução acética de quitosano, e pérolas foram formadas por gotejamento sobre uma solução de NaOH 2M. Os materiais sintetizados foram caracterizados por difração de raios-X (DRX), espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FESEM).

O composto final (quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>) atingiu um valor próximo a 51% de eficiência na degradação fotocatalítica oxidativa de ibuprofeno em solução aquosa. Quanto aos testes de inativação bacteriana de *Escherichia coli*, observou-se uma redução de até dois ordens de magnitude, correspondendo a 21% no final do processo fotocatalítico.

**Palavras-chave:** nanocompuestos; quitosana; ferrita de cobalto; nitreto de carbono; fotocatalise; inativação bacteriana.

## Introducción

La contaminación microbiana de agua potable es considerada un enemigo silencioso porque causa la muerte de millones de personas en el mundo, esto se debe principalmente a la exposición de estas aguas a secreciones humanas [1]. Por ejemplo, la presencia de la bacteria *Escherichia coli* en el agua potable es evidente, en mayor medida, en zonas rurales donde el sistema sanitario es deficiente, por lo que se contaminan los ríos que luego son usados para el riego agrícola, pues no existe conciencia sobre el uso de estas aguas [2]. También se evidencia este problema en asentamientos humanos (poblaciones recién constituidas informalmente), donde las cargas bacterianas podrían estar contenidas en camiones cisterna que movilizan agua a las zonas más alejadas, en donde los sistemas de agua y desagüe aún no han sido implementados. Además, implementar estrategias de prevención para mantener la calidad del agua potable no es una prioridad política, razón por la cual algunos investigadores desarrollan sistemas de tratamiento de agua como irradiación UV [3–5], cloración [6, 7] y ozonización [8–10]; sin embargo, se presentan ciertas limitaciones por la resistencia natural de ciertos patógenos a dichos tratamientos, lo que ocasiona que los tratamientos queden incompletos [11–13]. Frente a ello, se hacen esfuerzos por innovar en tecnologías de desinfección y remediación que permitan procesos eficientes, robustos y viables económica y medioambientalmente.

El incremento exponencial de la capacidad de adsorción de materiales a escala nanométrica permite su uso como una ruta alternativa en la inactivación de bacterias. Como ejemplo se puede citar el nanocompuesto  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ , las propiedades antibacterianas de las nanopartículas de plata (NP-Ag), complementadas con la capacidad de recuperación magnética de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), fueron estudiadas frente a las bacterias *Enterobacter aerogenes* y *Enterococcus faecalis*, con eficiencias al 100% [14]. A su vez, Linklater *et al.* estudiaron un modelo biofísico de las interacciones entre nanopartículas y la membrana bacteriana y demuestran que una mayor afinidad interactiva (superficial) permite el colapso de la capa lipídica debido un mayor estiramiento y ruptura de la membrana [15]. Por otro lado, evaluar nanomateriales que presenten, además, propiedades fotocatalíticas, incrementaría el rendimiento del tratamiento de aguas, lo cual evitaría el uso de sustancias químicas que produzcan, a su vez, sub productos de mayor toxicidad. Con ello se pretende que los procesos sean ecoamigables.

El quitosano es un biopolímero con carga positiva, obtenido por desacetilación parcial de la quitina (componente estructural del exoesqueleto de los crustáceos), y constituido principalmente por unidades de aminopolisacáridos [16, 17]. Sus características físico-químicas y estructurales le confieren una serie de propiedades tales como su biocompatibilidad, biodegradabilidad y no toxicidad al momento de formar materiales que se pueden aplicar en transporte y liberación de fármacos [18] y aditivo textil antimicrobiano [19]. En la literatura científica se ha reportado su acción antimicrobiana y elevada capacidad como adsorbente [20, 21]. Por ejemplo, se observó que el quitosano presenta actividad antimicrobiana contra patógenos gastrointestinales como *Salmonella* spp. y *E. coli* [22]. Específicamente, Ke *et al.* reportan la acción extracelular del quitosano como un proceso en el que este actúa como un quelante de metales, evitando la absorción de estos como nutrientes, además de alterar la permeabilidad celular [23]. Estas dos propiedades combinadas hacen que este material sea idóneo para la descontaminación de aguas con ingente carga bacteriana.

Sin embargo, las propiedades mecánicas de este biopolímero no son las adecuadas para su reutilización, debido a que suelen ser afectadas por fenómenos de hinchamiento y ruptura. Para mejorar dichas propiedades, se suelen agregar cargas sólidas a las formulaciones,

con la finalidad de conferir una mayor rigidez y durabilidad. Estas cargas pueden presentar, incluso, otras propiedades que potencien los efectos antimicrobianos. De este modo, la utilización de materiales de carga como el nitruro de carbono grafitico (CN) y las ferritas, con probada actividad fotocatalítica antimicrobiana [24], potencian la actividad en el compuesto.

Sanmugam *et al.* plantean la adición del quitosano para formar un compuesto con óxido de grafeno (OG) y dióxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ) que exhibe excelentes propiedades antibacteriales frente a *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* [25]. A su vez, Su *et al.* adicionan NP-Ag para formar un compuesto quitosano/NP-Ag/OG que permite la generación especies reactivas de oxígeno que desestabilizan el potencial de la membrana plasmática [26]. Por otro lado, Elemike *et al.* analizan la fotodegradación del colorante azul de metileno con un compuesto a base de quitosano y óxido de zinc (ZnO) cuyo resultado es un aumento del 72 al 78% con la incorporación del quitosano. Además, un compuesto triple mejoraría un proceso de recombinación del par electrón-hueco, tal como lo evidencian D. Arikal y A. Kallingal con la formación del compuesto quitosano/óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ )/óxido de magnesio (MgO) para la degradación de colorantes azo y antraquinona que fue monitoreado por espectroscopía UV-Vis [27].

A diferencia de otros materiales fotocatalíticos clásicos, como el  $\text{TiO}_2$  o ZnO, las ferritas y el nitruro de carbono poseen una energía de banda prohibida en la región del espectro visible, lo que hace que los procesos fotocatalíticos sean posibles con un menor gasto energético, utilizando luz solar o artificial. El nitruro de carbono (g-CN) ha atraído amplia atención como material robusto, libre de metales y activo en la luz visible; además, se obtiene de elementos de bajo costo y abundantes en la tierra. Existen diversas aplicaciones fotocatalíticas, por ejemplo, para la producción de hidrógeno a partir de la descomposición del agua, para reducción del dióxido de carbono, para degradación de contaminantes y, recientemente explorado, la propiedad antimicrobiana por Zhang *et al.* [28].

Por otro lado, las nanoláminas coloidales 2D derivadas de compuestos en capas tienen una morfología de alta relación de aspecto con un gran tamaño lateral y un espesor ultrafino en tamaño molecular. En cuanto a la actividad fotocatalítica de los materiales, las nanoláminas 2D tienen ventajas únicas, como una gran superficie para proporcionar una alta densidad de sitios activos y una corta distancia para la difusión de carga a la superficie. Por ejemplo, Yang *et al.* investigaron el método de exfoliación líquida de  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  a granel para obtener nanohojas en 2D [29].

El presente trabajo plantea la producción de materiales compuestos basados en hidrogeles de quitosano, los cuales son embebidos con partículas de ferrita de cobalto (CF) y nitruro de carbono grafitico (g-CN), con aplicaciones en remediación de cuerpos de aguas contaminados con bacterias (*E. coli*) e ibuprofeno (contaminante emergente) mediante proceso fotocatalítico. Se ha planteado la acción sinérgica que puede producir la aplicación conjunta de los tres materiales indicados. El aporte del trabajo de investigación se basa en la necesidad de buscar materiales biocompatibles y ambientalmente amigables que permitan descontaminar las aguas que llegan a las zonas rurales de las ciudades, evitando dejar partículas suspendidas del mismo material utilizado, que puedan contaminar, de algún modo, las aguas que pretendemos potabilizar.

## Materiales y métodos

### Síntesis de materiales

#### Síntesis de nitruro de carbono grafitico (g-CN)

La síntesis g-CN fue realizada mediante el método de condensación térmica, de acuerdo con lo reportado por Bao *et al.* y Fang

et al. [30, 31]. Se utilizaron como precursores melamina (1,3,5-triazina-2,4,6-triamina) y urea, ambos al 99% de pureza (MERCK). La síntesis del nitruro de carbono a partir de la urea (CN-bulk\_u) se llevó a cabo en una mufla donde se sometió a un calentamiento graduado, teniendo como rango de temperatura de 250 y 350 °C hasta que llegó a los 550 °C con una rampa de 2 °C min<sup>-1</sup> por 5 h, esto con la finalidad de asegurar la polimerización. De forma similar la síntesis del nitruro de carbono (CN) a partir de la melamina (CN-bulk\_m) se calcinó a 550 °C con una rampa de 3 °C min<sup>-1</sup> por 3 h. Luego de la calcinación, el polvo amarillo que corresponde al nitruro de carbono se lavó con una solución de HNO<sub>3</sub> al 0,1% en peso y agua destilada para eliminar residuos alcalinos provenientes de la pirólisis de, por ejemplo, el amoníaco, tal como Yang et al. lo mencionan [29]. A continuación, podemos mostrar un esquema donde se evidencia lo expresado líneas arriba.



Figura 1. Rutas para obtener el nitruro de carbono grafítico (g-CN).

Tabla 1. Condiciones para la calcinación de los precursores de g-CN.

Sustrato	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Rampa de calentamiento (°C min <sup>-1</sup> )
Melamina	550	4	3
Urea	250	1	2
	350	2	
	500	2	

Finalmente, la obtención del material g-CN se llevó a cabo mediante un tratamiento alcalino de acuerdo con lo reportado por Yao et al., donde se utilizó un sistema de reflujo [32]. Para ello, se adicionaron 2 g de CN suspendidos en 100 mL de solución acuosa de NaOH a 0,2 mol L<sup>-1</sup> y la solución se llevó a una temperatura de 100 °C por 11 h. Después de enfriar a temperatura ambiente se lavó con agua ultrapura y se centrifugó a 8000 rpm durante 10 min para retirar el bulk de nitruro que no reaccionó. Los productos coloidales obtenidos se denominan g-CN\_u y g-CN\_m obtenidas de los CN de bulk\_u y bulk\_m, respectivamente.

### Síntesis del material ferrita de cobalto/nitruro de carbono (CF/g-CN)

La formación del material en mención se llevó a cabo utilizando relaciones en peso CF/g-CN de 1/1 y 1/5, identificadas como 1CF1g-CN\_m y 1CF5g-CN\_m, respectivamente. Para la obtención de 1CF1g-CN\_m se siguió el método acuoso previamente reportado, con algunas modificaciones [33]. Se disolvieron en agua cantidades adecuadas de FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O y Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, se mezclaron y se completaron hasta un volumen final de 250 mL para obtener concentraciones molares de 0,32 y 0,16 mol L<sup>-1</sup>, respectivamente. Se prepararon 250 mL de solución de KNO<sub>3</sub> 1,6 mol L<sup>-1</sup>, la cual se transfirió a un matraz de 1 L y se añadieron 2,9 g de g-CN\_m. El sistema se sonicó en 3 ciclos de 10 min al 30% de potencia. Ambas soluciones se mezclaron en un matraz de tres bocas durante 5 min burbujeando nitrógeno constantemente. Posteriormente se adicionó gota a gota solución de KOH 2 mol L<sup>-1</sup> hasta obtener un pH de 12. El matraz se

cerró herméticamente y se realizó un proceso térmico por 24 h a 95 °C. Las partículas se enjuagaron ocho veces con agua destilada utilizando un imán de hierro para separar las partículas. Finalmente, se secó en un horno de convección a 40 °C durante 24 h.

Para la síntesis de 1CF5g-CN\_m se realizó el mismo proceso; pero se redujeron a la quinta parte las cantidades de FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O y KNO<sub>3</sub>, manteniendo la misma masa de g-CN\_m, y se redujo, también, la concentración de KOH a 1 mol L<sup>-1</sup>. Se toma el producto 1CF5g-CN\_m como material para la obtención del compuesto final.

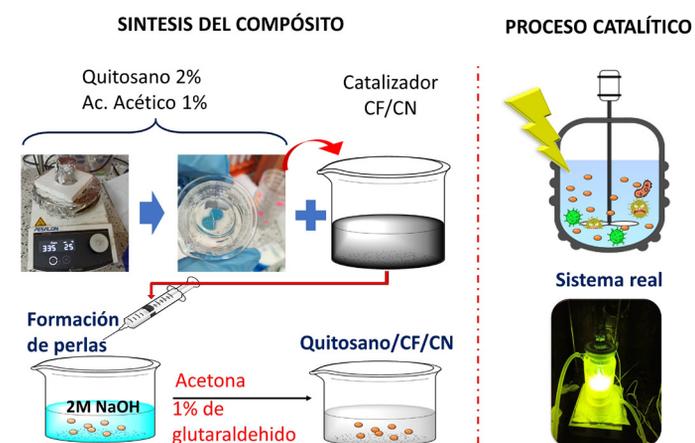


Figura 2. Formación del nanocompuesto quitosano/CF/g-CN.

### Formación de perlas del nanocompuesto fotocatalizador quitosano/1CF5g-CN\_m

Para la formación de las perlas de quitosano se dispersaron 0,2 g de 1CF5g-CN\_m en 100 mL de una solución al 2% de quitosano previamente disuelto en ácido acético al 1% (v/v), luego se utilizó un baño ultrasónico por 15 min para la homogenización. Esta dispersión coloidal se adicionó con goteo constante a 500 mL de una solución de NaOH 2 mol L<sup>-1</sup> para la formación de las perlas, las cuales fueron separadas de la solución básica por filtración. Posteriormente, las perlas obtenidas fueron sumergidas en una solución acetona:agua (2:1) que contenía 1 mL de glutaraldehído, con la finalidad de entrecruzar el material polimérico y conferirle mejores propiedades mecánicas.

### Degradación fotocatalítica del fármaco ibuprofeno

Para las pruebas de degradación se utilizó una fuente de radiación que consta de dos leds de 10 W (marca CHANZON) con longitud de onda próxima a 420 nm. En cada experimento se tomaron 0,2 g del fotocatalizador y se mezclaron con 250 mL de solución acuosa de 15 ppm de ibuprofeno. Después de agitar durante 30 min hasta alcanzar el equilibrio de adsorción, la solución se irradió bajo luz visible para la degradación fotocatalítica. Durante este proceso, cada hora se tomaron 3 mL de solución hasta culminar las 4 h, y se usó un filtro de membrana de 0,45 μm para obtener una solución clarificada, para luego analizarlo con un espectrofotómetro UV-VIS (UV-1280, SHIMADZU) en la región de longitud de onda de 190-320 nm.

### Inactivación de la Escherichia coli

Para la evaluación de las propiedades antibacterianas del nanocompuesto sintetizado, se cultivaron bacterias de *E. coli* en medio de crecimiento, en un caldo de cultivo (100 mL) a 37 °C durante 16 h con agitación y se recogieron mediante centrifugación (4000 rpm durante 10 min). Después del lavado con una solución de NaCl al 0,9%, las células de *E. coli* se resuspendieron en una solución salina de NaCl (0,9%) y se obtuvo una densidad celular inicial de 10<sup>6</sup> UFC mL<sup>-1</sup>. Luego se añadieron 0,001 g del fotocatalizador a 10 mL de solución de bacterias (10<sup>6</sup> UFC mL<sup>-1</sup>). La solución mixta se agitó a temperatura ambiente bajo la irradiación de luz visible (420 nm) mediante una

lámpara LED. Después de 0, 15, 30, 45 y 60 min de irradiación, se extrajo 0,1 mL de la solución, seguido de dilución en serie con la solución de NaCl (0,9%). Luego, la muestra diluida se diseminó uniformemente en placas Petri con un agar nutritivo y, después de incubar a 37 °C durante 18 h, se determinó el recuento de células viables mediante conteo visual. Todos los experimentos de desinfección fotocatalítica se realizaron por triplicado.

### Caracterización de los materiales sintetizados

#### Difracción de Rayos X (DRX)

Para el análisis de DRX se utilizó un difractómetro de rayos X Bruker (Bruker-8Advance, Alemania, 2017). Las condiciones de trabajo del DRX fueron: configuración del generador en 10 mA y 30 kV; tipo de difractómetro: Theta/Theta; material del ánodo: Cu, K-Alpha1 1,54060 Å; y por un lapso de 0,500 s de escaneo.

#### Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Se utilizó un espectrofotómetro Perkin Elmer, modelo Alpha, por el método de reflectancia total atenuada (ATR). Por medio de esta caracterización se observaron las bandas características del g-CN para la comparación de los dos precursores (melamina y urea). A su vez, realizamos una comparación del quitosano y el nanocompuesto quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub> para determinar las interacciones que se forman.

#### Microscopia Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)

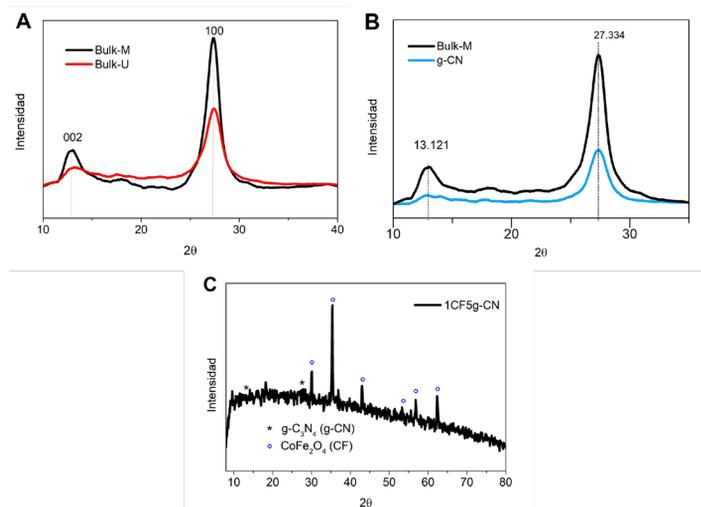
Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo Hitachi Su8230 (HITACHI, Japón, 2017). Las imágenes se observaron a 3 kV utilizando un WD = 3,3 mm. Se dispersó aproximadamente 1 mg de CF en 25 mL de agua pura utilizando un ultrasonicador Branson, Ultrasonic Water Bath (EEUU), a 50 Hz durante 10 min. Después de eso, una gota de las partículas dispersas se colocó sobre una cinta de carbón adherida al soporte de aluminio y se dejó secar en un desecador durante 1 h a temperatura ambiente.

## Resultados y discusión

### Caracterización de materiales sintetizados

#### Difracción de rayos X

En la **figura 3** se muestran los difractogramas de CN bulk sintetizado a partir de dos diferentes precursores: melamina y urea (bulk-M y bulk-U respectivamente). En ambos difractogramas (**figura 3A**) se evidencian los planos de crecimiento (002) y (100) bajo los ángulos de 27,6 y 13,01° respectivamente, que corresponden a planos cristalino-hexagonales [34]. Según Tong *et al.*, los picos con 13 y 27,5° corresponden a unidades de triazina y al apilamiento aromático



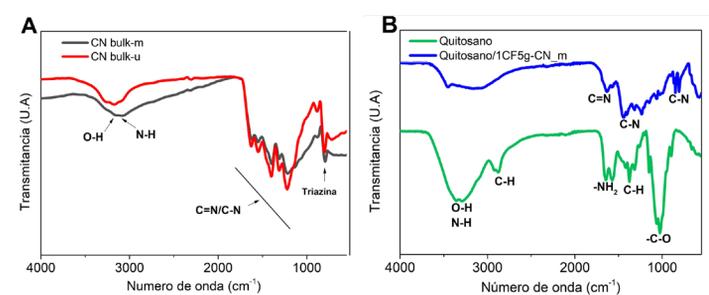
**Figura 3.** Difractograma de rayos X de A: CN de precursor melamina (bulk-M) y urea (bulk-U); B: comparación bulk-M y g-CN; y C: el compuesto 1CF5g-CN<sub>m</sub>.

entre capas respectivamente [34]. En la **figura 3B** se muestran los difractogramas de g-CN en comparación con el CN bulk<sub>m</sub>, de igual forma se evidencia los planos (002) y (100). El pico que corresponde al plano (002), con ángulo de 27,3°, es un reflejo de apilamiento de las capas característico de sistemas aromáticos [29]; además, en la **figura 3B** se evidencia una disminución en la intensidad del pico en g-CN frente a Bulk-M, lo que demuestra claramente que la exfoliación fue exitosa, hecho que se puede comprobar en la **figura 5A**, que corresponde a la micrografía SEM.

El difractograma de rayos X del material 1CF5g-CN<sub>m</sub> muestra los picos cristalinos de la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de espinela inversa (PDF Card 22-1086). Los principales picos 2θ son: 30,1° (220), 35,4° (311), 43,1° (400), 53,4 (422), 56,9° (511) y 62,5° (440). De acuerdo con la ecuación Debye-Scherrer el tamaño promedio de la cristallita es de 15 nm, este valor es calculado a partir de la amplitud de la mitad del pico más intenso (311), concordante con el ensanchamiento de la amplitud de los picos cristalinos resultantes, en virtud de que un pico de difracción fino se relaciona a tamaños más grandes de las nanopartículas.

#### Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

En el espectro de CN sintetizados a partir de melamina y urea (bulk<sub>m</sub> y bulk<sub>u</sub>) se identificaron bandas entre 1650 a 800 cm<sup>-1</sup> que corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C=N y C-N pertenecientes a anillos heterocíclicos, así como una banda a 804 cm<sup>-1</sup> que se atribuye al modo de vibración de las unidades de triazina que conforman al CN [35, 36]. Aleatoriamente, utilizamos el CN sintetizado a partir de melamina (CN bulk<sub>m</sub>) porque presentó las mismas características espectroscópicas que el CN sintetizado a partir de urea (CN bulk<sub>u</sub>). Por lo tanto, no existen diferencias entre las nanofojas sintetizadas a partir de melamina y urea.



**Figura 4.** Espectro de FTIR de A: CN bulk<sub>m</sub> (precursor melamina) y CN bulk<sub>u</sub> (precursor urea); y B: quitosano y quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>.

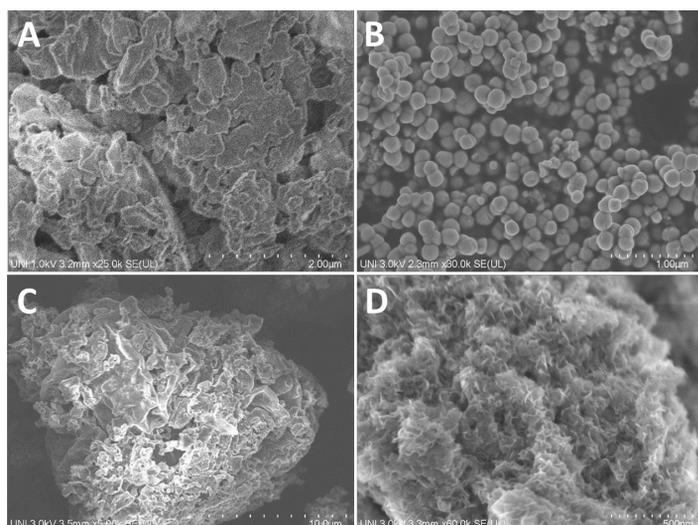
En la **figura 4B** se presenta el análisis espectroscópico para el compuesto quitosano/CF/CN en comparación al quitosano puro. El pico alrededor de 3445 cm<sup>-1</sup> se atribuye a la vibración de estiramiento de los grupos amino (-NH<sub>2</sub>) e hidroxilos (-OH) presentes en el quitosano. La disminución en la intensidad de este pico, en el nanocompuesto quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>, se debe a la reacción de los grupos amino (-NH<sub>2</sub>) del quitosano con el grupo carbonilo del glutaraldehído (**figura 6B**), hacia la formación de enlaces imina (N=C) presentes alrededor de 1640 cm<sup>-1</sup> [37]. El pico en 2877cm<sup>-1</sup> corresponde al enlace C-H presente en el biopolímero. Los picos alrededor de 1591 y 1654 cm<sup>-1</sup> se atribuyen a los grupos amino del quitosano. Finalmente, en 1067 cm<sup>-1</sup> se atribuye a la vibración de estiramiento del grupo C-O-C [20, 38].

Por otro lado, el análisis espectroscópico del compuesto muestra un mayor predominio de los picos de intensidad correspondientes al nitruro de carbono [39]. Los dos picos alrededor de 1232 y 1430 cm<sup>-1</sup> al estiramiento de los grupos C-N presentes en los anillos aromáticos, mientras que a 808 cm<sup>-1</sup> pertenece al modo anillo de la triazina que corresponde al heterociclo condensado de CN [40].

#### Microscopia electrónica de barrido

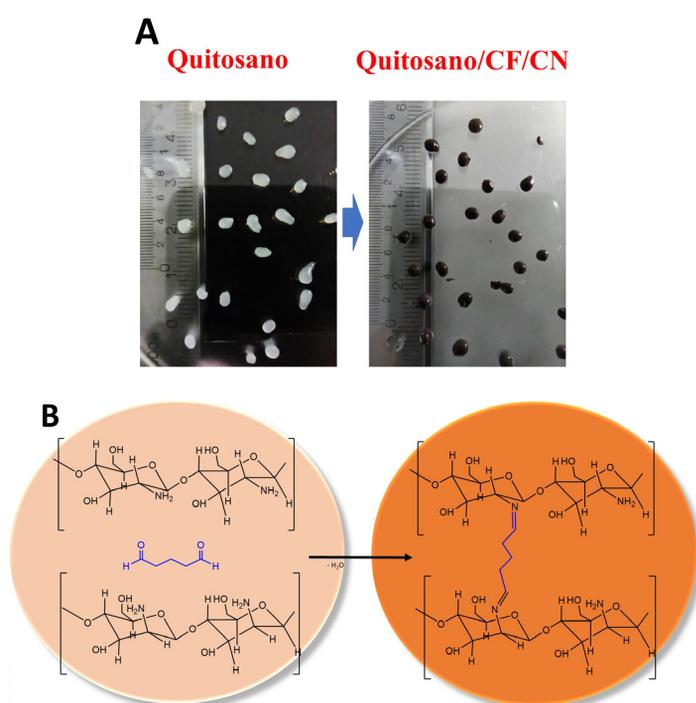
La **figura 5** muestra las imágenes SEM de los materiales formados.

En la **figura 5A** se observan las nano hojas de g-CN<sub>m</sub> en forma de escamas que previamente se exfoliaron con NaOH. La **figura 5B** focaliza las nanopartículas esféricas de la ferrita de cobalto (CF) (las cuales están soportadas sobre las nano hojas de g-CN<sub>m</sub>) con un tamaño promedio de  $94,5 \pm 10$  nm. Finalmente, en las **figuras 5C** y **5D** se muestra la morfología del material 1CF5g-CN<sub>m</sub> en dos magnificaciones diferentes y se evidencia la presencia de los dos materiales con eficiente interacción entre ellos.



**Figura 5.** Micrografía SEM de A: nano hojas de g-CN<sub>m</sub>; B: nanopartículas de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (CF) (soportadas sobre g-CN<sub>m</sub>); y C y D: material 1CF5g-CN<sub>m</sub>.

La **figura 6A** muestra las perlas formadas del fotocatalizador propiamente dicho, el nanocompuesto final: quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>, en comparación con las de quitosano puro. La formación de las perlas se da por la capacidad de entrecruzamiento del quitosano en presencia de glutaraldehído, mediante la formación de enlaces iminas o también llamados base de Schiff entre una amina primaria, presente en el quitosano, y un grupo aldehído proveniente del glutaraldehído (**figura 6B**) [41, 42]. Esta formación permite que las cadenas poliméricas se entrecrucen y formen armazones esféricos (perlas) que permiten la retención de materiales en su interior y en la superficie. Esta capacidad fue utilizada para poder incorporar a la mezcla el material 1CF5g-CN<sub>m</sub>.

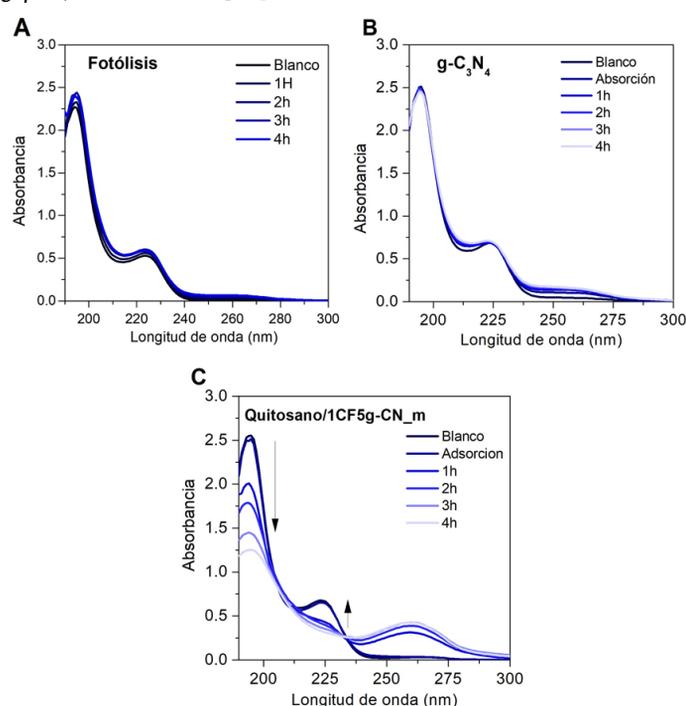


**Figura 6.** A: imagen a escala milimétrica de las perlas de quitosano y nanocompuesto quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>. B: proceso de entrecruzamiento de las unidades poliméricas.

## Aplicaciones fotocatalíticas

### Degradación fotocatalítica de fármaco ibuprofeno

La actividad fotocatalítica se realizó por fotodegradación del ibuprofeno. La **figura 7A** muestra la fotólisis del ibuprofeno para verificar la posible degradación debida a la radiación visible (a partir de 400 nm). Se observa una leve disminución de los picos de absorción que sugieren una degradación casi despreciable. Esto hace inferir que el ibuprofeno puede considerarse bastante estable bajo la luz visible (420 nm). De manera similar al sistema anterior, se probó la fotocatalisis (**figura 7B**), donde se muestra la fotodegradación del ibuprofeno empleando las nano hojas de g-CN<sub>m</sub>, se observa un aumento ligero en la degradación del fármaco, pero aún resulta poco significativa. Esto puede deberse a que, a pesar de que el nitruro de carbono puede absorber luz en el rango visible (a partir de 400 nm), también presenta algunas desventajas, tales como la recombinación del par electrón-hueco fotogenerados, además de presentar un *band gap* (2,7 eV) estrecho [28].



**Figura 7.** Espectros de absorción UV-Visible del ibuprofeno. A: sin catalizador, B: con nano hojas de g-CN<sub>m</sub>, y C: quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub> después de diferentes tiempos de irradiación.

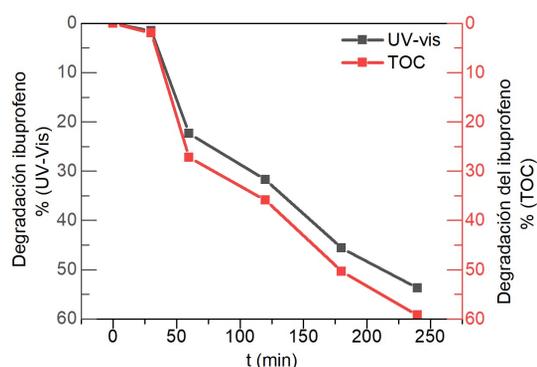
De manera similar al sistema anterior, se probó con el nanocompuesto fotocatalizador quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub> irradiando con luz visible (420 nm) donde se muestra las absorbancias en la **figura 7C**, alcanzando un valor de hasta 51% de degradación del contaminante emergente. El significativo porcentaje de degradación se debe a la mejora en la separación del par electrón-hueco que se da en la interfaz de g-CN<sub>m</sub> y CF. Esto permite, además, que los electrones y huecos generados puedan ser transferidos en ambos materiales, aumentando la eficiencia de los radicales generados (OH y O<sub>2</sub><sup>-</sup>) [28, 43, 44].

Para determinar el porcentaje de mineralización se realizaron medidas del carbono orgánico total (TOC) con un analizador TOC-LCPH/CPN (Shimadzu). El porcentaje de mineralización se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de mineralización} = \frac{[COT]_0 - [COT]_t}{[COT]_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $[COT]_0$  (mg L<sup>-1</sup>) es el carbono orgánico total de la solución inicial y  $[COT]_t$  (mg L<sup>-1</sup>) es la concentración de carbono orgánico al tiempo  $t$  de reacción.

En la **figura 8** se puede mostrar la comparación del porcentaje de degradación del ibuprofeno empleando la técnica espectroscópica UV-Vis con las medidas del carbono orgánico total (TOC).

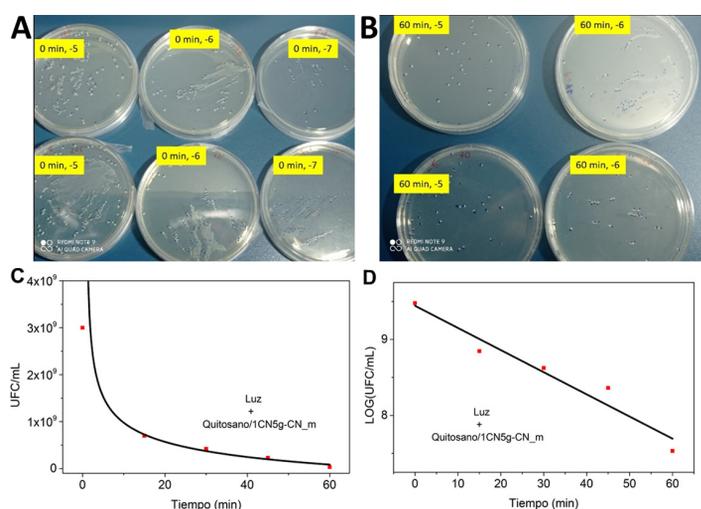


**Figura 8.** Porcentaje de degradación y mineralización empleando la técnica espectroscópica UV-Vis y mediciones del carbono orgánico total (TOC), respectivamente.

A diferencia de lo reportado por Wang *et al.*, que solo alcanza a degradar un 20% después de 4 h de irradiación UV-Vis, empleando solo como fotocatalizador al nitrato de carbono (CN) bulk [46], en la **figura 8** se puede evidenciar que la degradación del ibuprofeno alcanza un 50% donde se empleó el nanocompósito fotocatalizador quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>. Según lo reportado por Chen *et al.* esta amplia diferencia en la degradación se debe a que las nano Hojas de nitrato de carbono (CN) presentan una mayor área superficial específica que el nitrato de carbono (CN) bulk, lo que genera un aumento de los sitios activos y, a su vez, exhibe una mayor transferencia de carga permitiendo una mejor eficiencia en la degradación del fármaco acorde con lo reportado [45]. Además, en otro estudio realizado por Wang *et al.*, logran una heterounión de nitrato de carbono con nano Hojas de Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>, logrando degradar ibuprofeno alrededor del 95% por 1 h [46]. El fotocatalizador sintetizado a base de quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub> mostró un efecto positivo en la mejora de la degradación comparado al nitrato de carbono bulk.

### Inactivación fotocatalítica de la bacteria *E-coli*

Los resultados del recuento de UFC en placas de agar, después de 18 h de incubación y 60 min de iluminación, muestran que el número total de bacterias sobrevivientes en las muestras tratadas se reduce notablemente a aproximadamente dos órdenes de magnitud (**figura 9**). En comparación con el estado inicial, el porcentaje de células viables disminuye gradualmente tras la iluminación durante 30, 45 y 60 min, lo que da como resultado un 21% al final del proceso. La tendencia puede mejorar a lo largo del tiempo, aun usando la lámpara LED de baja intensidad con potencia de 50 W y longitud de onda cercana a 420 nm.



**Figura 9.** A y B: imágenes de formación de colonias obtenidas del control y 90 min después de la irradiación con la lámpara LED y el nanocompósito fotocatalizador quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>; C: concentración de *E-coli* como función del tiempo durante la fotocatalisis; y D: pseudo cinética de primer orden del nanocompósito quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub>.

Según la literatura, los compósitos utilizados pueden producir una serie de especies reactivas para inactivar bacterias como electrones, huecos y especies reactivas del oxígeno (ROS) que incluyen O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a través de la transformación de O<sub>2</sub> en una vía reductora en condiciones aeróbicas [47, 48]. Esto explicaría la eficiencia en la inactivación de *E. coli* y degradación fotocatalítica oxidativa de ibuprofeno. Adicionalmente a las actividades de CF en la separación del par electrón-hueco mencionados anteriormente, se ha informado específicamente que los nanomateriales g-CN pueden presentar especies que afectan la degradación de acuerdo al siguiente orden de especies oxidativas: huecos > aniones superóxidos > electrones [49, 50, 51].

### Conclusiones

Se logró sintetizar los materiales que conforman el nanocompósito quitosano/1CF5g-CN<sub>m</sub> y caracterizarlos a través de técnicas como DRX, SEM, FTIR. La DRX dio cuenta de los picos principales de difracción, se encontró que la estructura corresponde con la ferrita de cobalto (espinela inversa) y obtuvimos un tamaño de cristallita de 15 nm. El material compuesto obtenido presenta características fotocatalíticas con potencial aplicación para procesos de remediación y recuperación, debido a las propiedades magnéticas que le confiere la ferrita de cobalto. En cuanto a la actividad fotocatalítica del material, a longitudes de onda cercanas al visible (420 nm), presenta promisorio eficiencia para la remoción y tratamiento de contaminantes. La inactivación de bacterias presentó una cinética muy favorable de pseudo-primer orden al trabajar con una lámpara de mediana intensidad (50 W) durante 60 min, se observó una disminución de hasta dos órdenes de magnitud, llegando hasta un 21%. Las pruebas catalíticas frente al fármaco ibuprofeno alcanzaron hasta un 50% de degradación en las primeras 4 h. Estos resultados nos sugieren una aplicación potencial *in situ* para el tratamiento de aguas residuales para su posterior uso en zonas rurales, las cuales pueden presentar una carga bacteriana alta, y de aguas residuales de hospitales que presentan una elevada carga de medicamentos, donde el ibuprofeno es uno de los más utilizados.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa Doctoral 237-2015 (FONDECYT, Perú) y al fondo de investigación del Proyecto de Investigación Formativa 2021 (FC-PF-08-2021) del Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los autores agradecen a la Mg. Débora Alvarado por su apoyo en la orientación de las pruebas bacterianas.

### Referencias

- [1] M. A. Montgomery y M. Elimelech, "Water And Sanitation in Developing Countries: Including Health in the Equation", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, nro. 1, pp. 17–24, ene. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/es072435t>
- [2] C. Chu, E. C. Ryberg, S. K. Loeb, M.-J. Suh y J.-H. Kim, "Water Disinfection in Rural Areas Demands Unconventional Solar Technologies", *Acc. Chem. Res.*, vol. 52, nro. 5, pp. 1187–1195, may. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00578>
- [3] L. F. Timmermann, K. Ritter, D. Hillebrandt y T. Küpper, "Drinking water treatment with ultraviolet light for travelers – Evaluation of a mobile lightweight system", *Travel Med. Infect. Dis.*, vol. 13, nro. 6, pp. 466–474, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2015.10.005>
- [4] G.-Q. Li, W.-L. Wang, Z.-Y. Huo, Y. Lu y H.-Y. Hu, "Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photo-reactivation and dark repair of *Escherichia coli*", *Water Res.*, vol. 126, pp. 134–143, dic. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.030>
- [5] Z. O. Nazar y N. O. A. Al-Musawi, "Using Ultraviolet Technique for Well Water Disinfection", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 856, nro. 1, pp. 1–11, sep. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/856/1/012037>

- [6] D. Stefán, N. Erdélyi, B. Izsák, G. Záray y M. Vargha, "Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination", *Microchem. J.*, vol. 149, pp. 1–8, sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104008>
- [7] Y. Yeom *et al.*, "A review on the degradation efficiency, DBP formation, and toxicity variation in the UV/chlorine treatment of micropollutants", *Chem. Eng. J.*, vol. 424, pp. 1–47, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130053>
- [8] M. A. Shannon, P. W. Bohn, M. Elimelech, J. G. Georgiadis, B. J. Mariñas y A. M. Mayes, "Science and technology for water purification in the coming decades", *Nature*, vol. 452, nro. 7185, pp. 301–310 mar. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- [9] J. Wang y H. Chen, "Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective", *Sci. Total Environ.*, vol. 704, pp. 1–8, feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
- [10] T. Azuma, M. Usui y T. Hayashi, "Inactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria in Wastewater by Ozone-Based Advanced Water Treatment Processes", *Antibiotics*, vol. 11, nro. 2, feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11020210>
- [11] B. K. SaifAddin *et al.*, "AlGaN Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Grown on SiC Substrates", *ACS Photonics*, vol. 7, nro. 3, pp. 554–561, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00600>
- [12] B. Yang *et al.*, "Thermal Transport of AlN/Graphene/3C-SiC Typical Heterostructures with Different Crystallinities of Graphene", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 15, nro. 1, pp. 2384–2395, ene. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsam.2c17661>
- [13] Z. Li *et al.*, "Occurrence and ecological risk assessment of disinfection byproducts from chlorination of wastewater effluents in East China", *Water Res.*, vol. 157, pp. 247–257, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.072>
- [14] K. C. Barrientos, D. E. A. Iparraguirre y H. A. A. Cavero, "Síntesis y caracterización de nanocompuestos Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Ag: su efecto contra Enterobacter aerogenes y Enterococcus faecalis", *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 48, nro. 2, pp. 33–39, may. 2019. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n2.73724>
- [15] D. P. Linklater *et al.*, "Antibacterial Action of Nanoparticles by Lethal Stretching of Bacterial Cell Membranes", *Adv. Mater.*, vol. 32, nro. 52, pp. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202005679>
- [16] F. Sami El-banna, M. E. Mahfouz, S. Leporatti, M. El-Kemary y N. A. N. Hanafy, "Chitosan as a Natural Copolymer with Unique Properties for the Development of Hydrogels", *Appl. Sci.*, vol. 9, nro. 11, pp. 1–11, ene. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9112193>
- [17] M. F. Hamza, Y. Wei, K. Althumayri, A. Fouda y N. A. Hamad, "Synthesis and Characterization of Functionalized Chitosan Nanoparticles with Pyrimidine Derivative for Enhancing Ion Sorption and Application for Removal of Contaminants", *Materials*, vol. 15, nro. 13, pp. 1–15, ene. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15134676>
- [18] V. Mikušová y P. Mikuš, "Advances in Chitosan-Based Nanoparticles for Drug Delivery", *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, nro. 17, pp. 1–17, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22179652>
- [19] M. Korica *et al.*, "Chitosan Nanoparticles Functionalized Viscose Fabrics as Potentially Durable Antibacterial Medical Textiles", *Materials*, vol. 14, nro. 13, pp. 1–13, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133762>
- [20] N. E.-A. El-Naggar, A. M. Shiha, H. Mahrous y A. B. A. Mohamed, "Green synthesis of chitosan nanoparticles, optimization, characterization and antibacterial efficacy against multi drug resistant biofilm-forming *Acinetobacter baumannii*", *Sci. Rep.*, vol. 12, nro. 1, pp. 1–18, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24303-5>
- [21] J. Li *et al.*, "Characteristics of chitosan fiber and their effects towards improvement of antibacterial activity", *Carbohydr. Polym.*, vol. 280, pp. 1–9, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119031>
- [22] D. Yan, Y. Li, Y. Liu, N. Li, X. Zhang y C. Yan, "Antimicrobial Properties of Chitosan and Chitosan Derivatives in the Treatment of Enteric Infections", *Molecules*, vol. 26, nro. 23, pp. 1–27, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26237136>
- [23] C.-L. Ke, F.-S. Deng, C.-Y. Chuang y C.-H. Lin, "Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan", *Polymers*, vol. 13, nro. 6, pp. 1–21, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13060904>
- [24] E. Gastelo *et al.*, "Elimination of *Escherichia coli* in Water Using Cobalt Ferrite Nanoparticles: Laboratory and Pilot Plant Experiments", *Materials*, vol. 12, nro. 13, pp. 1–12, ene. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132103>
- [25] A. Sanmugam *et al.*, "Synthesis of chitosan based reduced graphene oxide-CeO<sub>2</sub> nanocomposites for drug delivery and antibacterial applications", *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 145, pp. 1–10, sep. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbm.2023.106033>
- [26] Z. Su *et al.*, "Chitosan/Silver Nanoparticle/Graphene Oxide Nanocomposites with Multi-Drug Release, Antimicrobial, and Photothermal Conversion Functions", *Materials*, vol. 14, nro. 9, pp. 1–17, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14092351>
- [27] D. Arikal y A. Kallingal, "Photocatalytic degradation of azo and anthraquinone dye using TiO<sub>2</sub>/MgO nanocomposite immobilized chitosan hydrogels", *Environ. Technol.*, vol. 42, nro. 15, pp. 2278–2291, jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1701094>
- [28] S. Zhang *et al.*, "In Situ Synthesis of Water-Soluble Magnetic Graphitic Carbon Nitride Photocatalyst and Its Synergistic Catalytic Performance", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, nro. 23, pp. 12735–12743, dic. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/am404123z>
- [29] Y. Yang *et al.*, "Preparation and enhanced visible-light photocatalytic activity of silver deposited graphitic carbon nitride plasmonic photocatalyst", *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 142–143, pp. 828–837, oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.06.026>
- [30] N. Bao, X. Hu, Q. Zhang, X. Miao, X. Jie y S. Zhou, "Synthesis of porous carbon-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets with enhanced visible-light photocatalytic activity", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 403, pp. 682–690, may. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.256>
- [31] H.-B. Fang, Y. Luo, Y.-Z. Zheng, W. Ma y X. Tao, "Facile Large-Scale Synthesis of Urea-Derived Porous Graphitic Carbon Nitride with Extraordinary Visible-Light Spectrum Photodegradation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, nro. 16, pp. 4506–4514, abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00041>
- [32] C. Yao, *et al.*, "Facile surface modification of textiles with photocatalytic carbon nitride nanosheets and the excellent performance for self-cleaning and degradation of gaseous formaldehyde", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 533, pp. 144–153, ene. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.08.058>
- [33] S. Saire-Saire *et al.*, "Green synthesis of Au decorated CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for catalytic reduction of 4-nitrophenol and dimethylphenylsilane oxidation", *RSC Adv.*, vol. 9, nro. 38, pp. 22116–22123, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RA04222A>
- [34] M. A. Alcudia-Ramos *et al.*, "Fabrication of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction composite for enhanced photocatalytic hydrogen production", *Ceram. Int.*, vol. 46, nro. 1, pp. 38–45, ene. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.228>
- [35] P. Praus *et al.*, "The presence and effect of oxygen in graphitic carbon nitride synthesized in air and nitrogen atmosphere", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 529, pp. 1–28, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147086>
- [36] Y. Hong, C. Li, Z. Fang, B. Luo y W. Shi, "Rational synthesis of ultrathin graphitic carbon nitride nanosheets for efficient pho-

- tocatalytic hydrogen evolution”, *Carbon*, vol. 121, pp. 463–471, sep. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.020>
- [37] M. A. Hassan, A. M. Omer, E. Abbas, W. M. A. Baset y T. M. Tamer, “Preparation, physicochemical characterization and antimicrobial activities of novel two phenolic chitosan Schiff base derivatives”, *Sci. Rep.*, vol. 8, nro. 1, pp. 1–14, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29650-w>
- [38] S. Hesami, S. Safi, K. Larijani, H. N. Badi, V. Abdossi y M. Hadidi, “Synthesis and characterization of chitosan nanoparticles loaded with greater celandine (*Chelidonium majus* L.) essential oil as an anticancer agent on MCF-7 cell line”, *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 194, pp. 974–981, ene. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.155>
- [39] S. Khizar et al., “Aminodextran Coated CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles for Combined Magnetic Resonance Imaging and Hyperthermia”, *Nanomaterials*, vol. 10, nro. 11, pp. 1–16, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano10112182>
- [40] J. Xu, L. Zhang, R. Shi y Y. Zhu, “Chemical exfoliation of graphitic carbon nitride for efficient heterogeneous photocatalysis”, *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, nro. 46, pp. 14766–14772, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3TA13188B>
- [41] J. Xu, Y. Liu y S. Hsu, “Hydrogels Based on Schiff Base Linkages for Biomedical Applications”, *Molecules*, vol. 24, nro. 16, pp. 1–21, ene. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24163005>
- [42] H. Ozay, P. Ilgin y O. Ozay, “Novel hydrogels based on cross-linked chitosan with formyl-phosphazene using Schiff-base reaction”, *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, vol. 70, nro. 4, pp. 246–255, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00914037.2019.1706514>
- [43] Y. Li, Z. Xia, Q. Yang, L. Wang y Y. Xing, “Review on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based S-scheme heterojunction photocatalysts”, *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 125, pp. 128–144, oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.02.035>
- [44] Q. Xu, S. Wageh, A. A. Al-Ghamdi y X. Li, “Design principle of S-scheme heterojunction photocatalyst”, *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 124, pp. 171–173, oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.02.016>
- [45] G. Chen et al., “S-scheme heterojunction of crystalline carbon nitride nanosheets and ultrafine WO<sub>3</sub> nanoparticles for photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 140, pp. 103–112, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.05.028>
- [46] J. Wang et al., “Atomic scale g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> 2D/2D heterojunction with enhanced photocatalytic degradation of ibuprofen under visible light irradiation”, *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 209, pp. 285–294, jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.03.019>
- [47] G. Liu, Z. Zhang, M. Lv, H. Wang, D. Chen y Y. Feng, “Photodegradation performance and transformation mechanisms of sulfamethoxazole by porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> modified with ammonia bicarbonate”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 235, pp. 1–10, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116172>
- [48] G. Liu, M. Liao, Z. Zhang, H. Wang, D. Chen y Y. Feng, “Enhanced photodegradation performance of Rhodamine B with g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> modified by carbon nanotubes”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 244, pp. 1–10, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116618>
- [49] J. Wang, Y. Chen, Y. Shen, S. Liu y Y. Zhang, “Coupling polymorphic nanostructured carbon nitrides into an isotype heterojunction with boosted photocatalytic H<sub>2</sub> evolution”, *Chem. Commun.*, vol. 53, nro. 20, pp. 2978–2981, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7CC00356K>
- [50] S. Panneri et al., “Photoregenerable, Bifunctional Granules of Carbon-Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as Adsorptive Photocatalyst for the Efficient Removal of Tetracycline Antibiotic”, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, nro. 2, pp. 1610–1618, feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02383>
- [51] X. Guo, J. Duan, C. Li, Z. Zhang y W. Wang, “Fabrication of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalysts with a special bilayer structure for visible light photocatalytic application”, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 599, pp. 1–10, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124931>

**Citación del artículo:**

S. Saire-Saire, S. Canchari, K. Changanqui, J. Montes de Oca, K. Revollar, H. Alarcón y A. Corzo Lucioni, “Nanocompósito basado en microesferas de quitosano/CF/CN como promisorio inactivador de *Escherichia coli*”, *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 52, no. 2, pp. 20–27, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n2.111340>