

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

TESIS

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN
DE AIRE DE INTERIORES MEDIANTE LA FOTOCATÁLISIS
HETEROGÉNEA**

PRESENTA:

M. en C. Jorge Humberto Martínez Montelongo

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

TUTORES:

Dra. Iliana Ernestina Medina Ramírez

Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano

INTEGRANTE DEL COMITÉ TUTORAL

Dra. Norma Angelica Chávez Vela

Aguascalientes, Ags. Enero de 2025

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



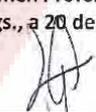
MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTÍNEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN DE AIRE DE INTERIORES MEDIANTE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 20 de enero de 2025.



Dra. Iliana Ernestina Medina Ramírez
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

uaa.mx /

Código: DG-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19



MTR. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

P R E S E N T E

Por medio del presente como **CO-TUTOR** designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTÍNEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN DE AIRE DE INTERIORES MEDIANTE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 17 de de enero de 2025



Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

UNIDAD AGUASCALIENTES

Prof. Constitución No.667, Fracc. Reserva Loma Bonita, CP 20200, Aguascalientes, Ags, México. Tel. (449) 442 81 24 al 26 www.cio.mx

CITTA

Circuito Tecnopolo Sur Nums. 119 , Fraccionamiento Tecnopolo Pocitos II, C.P. 20313, Aguascalientes, Ags, México. Tel.(449) 473 90 14 al 17 <https://dti.cio.mx/laboratorios/citta>



2025
Año de
La Mujer
Indígena



MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTÍNEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN DE AIRE DE INTERIORES MEDIANTE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 18 de enero de 2025



Dra. Norma Angelica Chávez Vela
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

uaamx /  Código: DO-SFF-EQ-07
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 22/01/2025

NOMBRE: Jorge Humberto Martínez Montelongo ID 119037

PROGRAMA: Doctorado en ciencias biológicas LGAC (del posgrado): Química y Biorremediación

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Desarrollo de un prototipo para la desinfección de aire de interiores mediante la fotocatalisis heterogénea

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

Se desarrollaron dos prototipos para la purificación de aire de interiores, de los cuales se demostró su efectividad en ambientes reales (hospitales, transporte). Se estableció un convenio con el ISSSTE para el muestreo periódico de aire de interiores. Se inició el trámite de patente del prototipo de purificación de aire de interiores. Formación de recursos humanos, divulgación de resultados en foros nacionales e internacionales. Publicación de resultados en revista internacional indexada de alto impacto.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc.)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NA				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
En caso de Tesis por artículos científicos publicados				
				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
				El estudiante es el primer autor
				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI X
NO

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Gilberto Alejandro Ocampo Acosta

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Gilberto Alejandro Ocampo Acosta

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del IAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Alejandro Padilla Díaz

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. C. Jorge Martín Alférez Chávez

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SEE-FQ-15
Actualización: 01
Emisión: 28/04/20



Contents lists available at ScienceDirect

Chemosphere

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemosphere



Bismuth-based nanocomposites as potential materials for indoor air treatment

Jorge H. Martínez-Montelongo^a, Carlos A. Pineda-Arellano^b, Rafael Hernandez-Rangel^a, M.L. Jiménez-González^a, Israel Betancourt^c, Juan Manuel Peralta-Hernández^d, Iliana E. Medina-Ramírez^{a,*}

^a Chemistry Department, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad 940, Aguascalientes, Ags, Mexico

^b CONAHCYT-Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Ags, 20200, Mexico

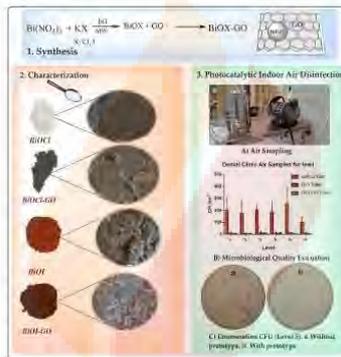
^c Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico

^d Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Guanajuato, 36050, Mexico

HIGHLIGHTS

- Synthesis of BiOX (X = Cl, I) using a MW-activated solvothermal route.
- The 3D hierarchical structures of BiOX eases the adsorption of pollutants followed by photocatalytic oxidation.
- BiOX-GO NMs are visible light active and exhibit enhanced antimicrobial activity.
- BiOX and BiOX-GO NMs exert excellent photocatalytic activity for hospital indoor air disinfection.

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Air pollution is a worldwide health hazard; thus, improving air quality is a demanding need. Photocatalysis is a robust strategy for air treatment. The boosted activity of the photocatalytic system depends on tuning their properties for the particular application. BiOX (X: Cl, I) compounds are emergent photocatalytic systems with numerous advantages for air treatment. However, their optical properties (E_g) and fast recombination of active species (e^-/h^+) limit their practical applications. In this study, we remark on the properties of BiOX-GO systems for indoor air purification. We use a microwave-activated solvothermal technique to synthesize the nanomaterials (NMs). BiOX NMs exhibit hierarchical 3D structures, crystallinity, and tunable optical absorption properties. BiOX-GO composites present an enhanced visible-light photocatalytic activity due to the electron acceptor capacity of GO and modification of E_g . The indoor air disinfection capacity of the NMs ranked as

* Corresponding author.

E-mail addresses: iemedina@correo.uaa.mx, iemedina1@gmail.com (I.E. Medina-Ramírez).

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143539>

Received 2 May 2024; Received in revised form 9 September 2024; Accepted 12 October 2024

Available online 19 October 2024

0045-6535/© 2024 Elsevier Ltd. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado para desarrollar los estudios de posgrado y la elaboración del proyecto de tesis.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) por el respaldo al realizar la estancia durante el desarrollo del trabajo de tesis.

Gracias a mi comité tutoral, la doctora Iliana Medina que fungió como tutor principal en el desarrollo de tesis, su apoyo, guía y consejos me dejan una gran enseñanza académica y personal. Al doctor Carlos Pineda co-tutor por su apoyo, guía y observaciones del trabajo, además del apoyo en el desarrollo de actividades en el Centro de Investigaciones en Óptica a quien también se extiende el agradecimiento. A la doctora Norma Chávez como asesora en el trabajo de tesis, por su revisión y consejos para culminar exitosamente.

Agradezco a M. C. M. Christian Albor Cortés por el apoyo en la caracterización por SEM y XRD y a M. I. Juan Margarito Sarabia Torres por apoyo técnico en el diseño, construcción y control del prototipo de purificación de esta tesis.

A mi familia que han apoyado todas mis actividades personales y académicas, además de motivar en todo momento las decisiones que he tomado. Mis padres Juana Montelongo y Jorge Martínez, mis hermanos Rocío Martínez y Gerardo Martínez, mis sobrinos Yosef Rodríguez, Axel Rodríguez y Gabriel Rodríguez.

Agradezco a mis compañeros del laboratorio de química organometálica por su apoyo y buenos momentos Gladis, Martha, Rafael, Arturo, Enya y Beto. A mis compañeros y amigos de la UAA Adela, Ariel, Estefanía, Isabel, Janine, Javier, Karina, Mónica, Pilar, Samanta y Tania. A mis amigos de la vida Susana, Ana, Cinthia, Viridiana, Jacky, Paty, Alberto, Ricardo y Daniel. En especial a Ady por su apoyo y excelentes consejos.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
1. Marco teórico.....	11
1.1. Calidad de aire interior.....	11
1.1.1. <i>Aire de interior en hospitales</i>	12
1.1.2. <i>Aire interior en transportes públicos</i>	14
1.2. Tecnologías de desinfección de aire.....	15
1.2.1. <i>Filtración</i>	15
1.2.2. <i>Dilución o ventilación mecánica</i>	17
1.2.3. <i>Procesos avanzados de oxidación</i>	18
1.2.3.1. <i>Luz ultravioleta</i>	18
1.2.3.2. <i>Ozonización</i>	20
1.2.3.3. <i>Fotocatálisis</i>	21
1.2.4. <i>Fotocatalizadores</i>	22
1.3. Semiconductores.....	24
1.4. Nanomateriales.....	25
1.5. Partículas semimetálicas.....	25
1.5.1. <i>Bismuto</i>	26
1.5.1.1. <i>Oxi-halogenuros de Bismuto</i>	27
1.5.1.2. <i>Fotocatálisis con semiconductores basados en bismuto</i>	28
1.6. Decoración con grafeno.....	29
1.7. Dopaje con Plata.....	30
1.8. Reactores para la desinfección de aire.....	31
1.9. Diseño de reactores.....	32
1.9.1. <i>Reactores de lecho empacado</i>	33
2. ANTECEDENTES.....	34
3. JUSTIFICACIÓN.....	38
4. HIPÓTESIS.....	39
5. OBJETIVOS.....	39

5.1.	General:.....	39
5.2.	Específicos	39
6.	METODOLOGÍA.....	40
6.1.	Síntesis de materiales nanoestructurados	40
6.1.1.	<i>Síntesis de materiales BiOX, BiOX/GO (X = Cl o I)</i>	40
6.1.2.	<i>Síntesis de óxido de grafeno</i>	40
6.1.3.	<i>Síntesis de materiales AgX/BiOX/GO (X = Cl o I).....</i>	41
6.2.	Soporte de materiales.....	42
6.3.	Caracterización.....	42
6.3.1.	<i>Microscopia electronica de barrido (SEM-EDS).....</i>	42
6.3.2.	<i>Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)</i> 43	
6.3.3.	<i>Microscopía de fuerza atómica (AFM)</i>	43
6.3.4.	<i>Espectrofotometría Infrarroja (FT-IR).....</i>	43
6.3.5.	<i>Difracción de rayos X (DRX).....</i>	43
6.3.6.	<i>Espectroscopía de reflectancia difusa de UV-Vis (DRS)</i>	43
6.3.7.	<i>Análisis del área superficial S_{BET}</i>	44
6.3.8.	<i>Análisis electroquímico</i>	44
6.4.	Evaluación de eficiencia de desinfección.....	44
6.5.	Evaluación de la toxicidad	46
6.6.	Pruebas de desinfección de aire.....	46
6.7.	Diseño y construcción del filtro de aire	47
6.8.	Evaluación del filtro de aire.....	48
7.	RESULTADOS	50
7.1.	Síntesis de materiales.	50
7.2.	Soporte de materiales.....	51
7.3.	Caracterización.....	51
7.3.1.	<i>Microscopia electronica de barrido (SEM-EDS).....</i>	51
7.3.2.	<i>Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)</i> 57	
7.3.3.	<i>Microscopía de fuerza atómica (AFM)</i>	63
7.3.4.	<i>Análisis Infrarrojo (FT-IR).....</i>	64
7.3.5.	<i>Difracción de rayos X (DRX).....</i>	66

7.3.6.	<i>Espectroscopía de Reflectancia Difusa de UV-Vis (UV-DRS)</i>	67
7.3.7.	<i>Análisis de área superficial S_{BET}</i>	68
7.3.8.	<i>Análisis electroquímico</i>	70
7.4.	Evaluación de la actividad antibacteriana.....	71
7.5.	Evaluación de la toxicidad.....	74
7.6.	Pruebas de desinfección de aire.....	76
7.7.	Diseño y construcción del filtro de aire.....	80
7.8.	Desinfección con los modelos diseñados.....	81
8.	DISCUSION DE RESULTADOS.....	83
8.1.	Síntesis de materiales.....	83
8.2.	Soporte de materiales.....	85
8.3.	Caracterización.....	85
8.3.1.	<i>Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)</i>	85
8.3.2.	<i>Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)</i> 87	
8.3.3.	<i>Microscopía de fuerza atómica (AFM)</i>	89
8.3.4.	Análisis Infrarrojo (FT-IR).....	90
8.3.5.	<i>Difracción de rayos X (DRX)</i>	91
8.3.6.	<i>Espectroscopía de Reflectancia Difusa de UV-Vis (UV-DRS)</i>	92
8.3.7.	<i>Análisis de área superficial S_{BET}</i>	93
8.3.8.	<i>Análisis electroquímico</i>	94
8.4.	Evaluación de la actividad antibacteriana.....	94
8.5.	Evaluación de la toxicidad.....	97
8.6.	Pruebas de desinfección de aire.....	98
8.7.	Desinfección con los modelos diseñados.....	99
9.	CONCLUSIONES.....	100
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa entre las propiedades de GO y rGO 30

Tabla 2. Reactores para la desinfección de aire..... 32

Tabla 3. Preparación de medios para la interacción con NMs..... 45

Tabla 4. Características de los materiales sintetizados y porcentaje de rendimiento. 50

Tabla 5. Tamaños promedio de los materiales 54

Tabla 6. Análisis EDX de los materiales. 56

Tabla 7. Fases cristalinas para los patrones DRX de BiOX..... 67

Tabla 8. Valores de Band Gap para BiOI y BiOCl 67

Tabla 9. Valores de las propiedades superficiales de BiOX, GO y BiOX/GO. . 70

Tabla 10. CMI y CMB para cada material sintetizado..... 74

Tabla 11. Resultados de UFC/m³ en las muestras de aire sin filtro y con filtro de los materiales BiOI y BiOI/GO..... 78

Tabla 12. Unidades Formadoras de Colonia por metro cubico en las muestras de aire sin filtro y con filtro de BiOCl y BiOCl/GO..... 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de filtración por membranas, paso y retención de partículas a través de los filtros 15

Figura 2. Esquema de dilución mecánica de aire de interiores (Torres Melgarejo & Barrantes Peña, 2014)..... 17

Figura 3. Espectro electromagnético de radiación de la luz (nm). (tomada de: (PROEMISA, 2020)..... 19

Figura 4. Sistema de ventilación HVAC acoplado con luz UV. (modificado de: (Spicer, 2021b)..... 20

Figura 5. Representación gráfica del par electrón-hueco de un semiconductor. (Martínez-Montelongo et al., 2016) 22

Figura 6. Diagrama energético para las bandas de conducción y valencia de los diferentes semiconductores. (Jian & Sun, 2020)..... 23

Figura 7. Representación de los semiconductores tipo "n" y tipo "p" (Flores Cardona, 2022) 24

Figura 8. Representación de la escala nanométrica y micrométrica (Staff, 2015) 25

Figura 9. Estructuras cristalinas del bismuto-titanio.(He et al., 2014)..... 28

Figura 10. Imágenes de los materiales sintetizados de oxi-halogenuros de bismuto, así como sus compósitos con GO y con AgX. A) BiOI, B) BiOCl, C) BiOI/GO, D) BiOCl/GO, E) AgI/BiOI/GO, F) AgCl/BiOCl/GO, G) GO 51

Figura 11. Perlitas impregnadas de material sintetizado. A) Perlita, B) BiOI@perlita, C) BiOI/GO@perlita, D) BiOCl@perlita y E) BiOCl/GO@perlita. 51

Figura 12. Micrografías SEM: A) BiOI a x10,000. B) BiOCl a x25,000. C) BiOI a x30,000. D)BiOCl a x50,000..... 52

Figura 13. Micrografías SEM A)GO a x25,000. B)GO a x50,000. C)BiOI/GO a x25,000. D)BiOI/GO a x30,000, E) BiOCl/GO a x30,000 F) BiOCl/GO a x25,000. 53

Figura 14. Espectro EDS de las muestras de los materiales prístinos A) BiOI. B) BiOCl. C) GO. 54

Figura 15. Espectro EDS de las muestras de los materiales A) BiOI/GO B) BiOCl/GO C) GO..... 55

Figura 16. Espectro EDS de las muestras de los materiales con Ag A) AgI/BiOI/GO. B)AgCl/BiOCl/GO. 56

Figura 17. HRTEM de BiOI a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOI, B, C) Imagen TEM de los nanopétalos, E. F) distancias reticulares de BiOI, G, H) acercamientos de microfiores de BiOI compuestas por nanopétalos I) Patrón SAED..... 57

Figura 18. HRTEM de BiOI/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOI/GO, B, C) imágenes 2D de BiOI incorporado a la superficie de GO, E. F) distancias reticulares de BiOI, G, H) acercamientos de microfiores de BiOI/GO compuesto I) patrón SAED..... 58

Figura 19. HRTEM de BiOCl a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOCl, B, C) imágenes BiOCl en microflor y otras estructuras jerárquicas, E. F) distancias reticulares de BiOCl, G, H) acercamientos de microfiores de BiOCl compuestas, I) Patrón SAED 59

Figura 20. HRTEM de BiOCl/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D de las microfiores a altas magnificaciones, B, C) imágenes BiOCl/GO en microflor y otras estructuras jerárquicas, E. F) distancias reticulares de BiOCl/GO, G, H) acercamientos de microfiores de BiOCl/GO compuestas, I) Patrón SAED..... 60

Figura 21. HRTEM de AgI/BiOI/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del material. B, C) imágenes de de AgI/BiOI/GO y otras estructuras. E. F) distancias reticulares de AgI/BiOI/GO, G, H) acercamientos de microfiores de AgI/BiOI/GO, I) Patrón SAED..... 61

Figura 22. HRTEM de AgCl/BiOCl/GO. A) Estructura 3D del material. B, C) Nanopétalos de BiOCl. D) BiOCl sobre la superficie de GO. E. F) Distancias reticulares de AgI/BiOI/GO, G, H) Magnificaciones de nanopétalos, I) Patrón SAED. 62

Figura 23. Análisis AFM de sensor de altura para todos los materiales. A,D) GA, B,E) BiOI, C,F)BiOCl, G,J) GO, H,K) BiOI/GO I,L) BiOCl/GO 64

Figura 24. Espectros FT-IR del material puro y en compuesto. A) BiOI, B) BiOI/GO, C) BiOCl, D) BiOCl/GO, E) AgI/BiOI/GO F) GO. 65

Figura 25. DRX y cartas cristalográficas de los oxihalogenuros de bismuto A) BiOI (rojo) BiOI/GO (azul) GO (negro). B) BiOCl (rojo) BiOCl/GO (azul) GO (negro) 66

Figura 26. Representación de Tauc Plot para las estructuras de A) BiOI (rojo), BiOI/GO (azul) y GO (negro). B) BiOCl (rojo), BiOCl/GO (azul) y GO (negro). 68

Figura 27. Isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno y las correspondientes curvas de distribución de tamaño de poro (recuadro superior) de los materiales: A) GO, B) BiOI, C) BiOCl, D) BiOI/GO, E) BiOCl/GO..... 69

Figura 28. Voltamperometría cíclica de los materiales en oscuridad (gráfico negro) e irradiados con luz (gráfico rojo). A) BiOI, B) BiOI/GO, C) BiOCl, D) BiOCl/GO 71

Figura 29. Resultados de interacción de nanomateriales con *S. aureus*, C: control PBS G: control GA, 1: 20 µg/mL. 2: 60 µg/mL. 3: 125 µg/mL. Interacción con BiOI (A) y BiOCl (B)..... 72

Figura 30. Resultados de inhibición de *S. aureus* con 5 h bajo irradiación con luz visible con las concentraciones de 25 a 500 µg/mL 72

Figura 31. Resultados de inhibición de *S. aureus* con 8 h bajo irradiación con luz visible con las concentraciones de 25 a 200 µg/mL 73

Figura 32. Resultados de la interacción de *S. aureus* con los compósitos de AgI/BiOI/GO con irradiación de luz visible. A) control 1.5x10⁴ UFC/mL. B) Control GA. C) 25 µg/mL. D) 50 µg/mL. E) 100 µg/mL 73

Figura 33. Determinación de viabilidad celular por el ensayo CCK-8 (izquierda) y ensayo LDH (derecha) posterior a la exposición a los materiales de BiOI, BiOI/GO, BiOCl y BiOCl/GO. Los resultados fueron obtenidos de 3 experimentos independientes realizados por duplicado, cada barra representa la media ± DE (*p< 0.05, **p< 0.001), ANOVA de una vía, Bonferron..... 75

Figura 34. Impactador de cascada de Andersen en el muestreo de la clínica dental. 76

Figura 35. Bacterias impactadas en agar Mueller Hinton en un muestreo de aire, sin filtro y con el uso del filtro de los diferentes materiales BiOI, BiOI/GO, BiOCl y BiOCl/GO 77

Figura 36. Eficiencia de desinfección de unidades formadoras de colonia en los muestreos de aire sin filtro y con los filtros 79

Figura 37. UFC/m³ en los seis niveles del impactador de cascada de Andersen sin filtro (café) y con los filtros de BiOI (morado) y BiOI/GO (verde). 79

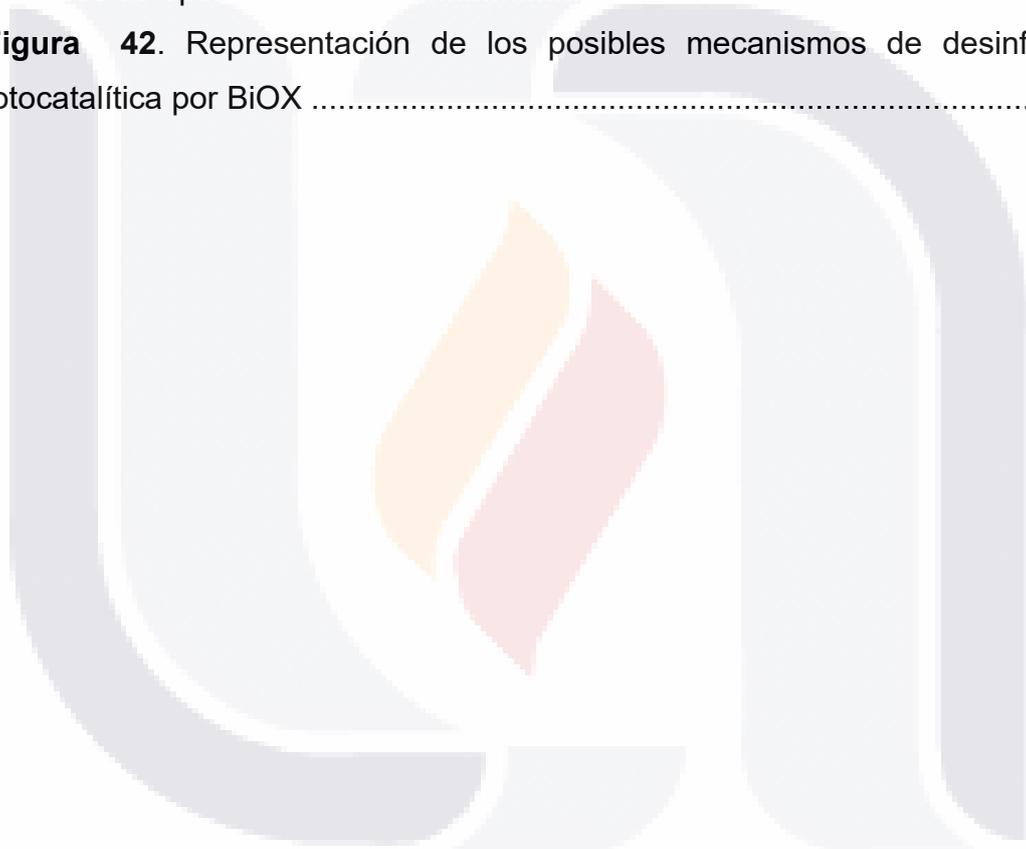
Figura 38. UFC/m³ en los seis niveles del impactador de cascada de Andersen sin filtro (café) y con los filtros de BiOCl (morado) y BiOCl/GO (verde). 80

Figura 39. Diseño digital en 3D del filtro de aire para transporte público. 80

Figura 40. Muestra de prototipo del transporte público con el impactador de cascada de Andersen de seis niveles. 81

Figura 41. Resultados del proceso de desinfección con los prototipos diseñados en ciclos de operación. 82

Figura 42. Representación de los posibles mecanismos de desinfección fotocatalítica por BiOX 97



RESUMEN

La calidad del aire en interiores es un problema crucial para la salud humana, contribuyendo a enfermedades respiratorias y al "Síndrome del Edificio Enfermo". La pandemia de COVID-19, resaltó la necesidad de sistemas eficaces de desinfección del aire en espacios cerrados. Los sistemas actuales de purificación de aire son efectivos a corto plazo, pero no controlan completamente la contaminación de aire de interiores. En este contexto, los procesos avanzados de oxidación (PAOs) como la fotocatalisis heterogénea, se presenta como una solución prometedora.

Este estudio se enfoca en la síntesis de fotocatalizadores basados en oxihalogenuros de bismuto (BiOX, donde X = I o Cl) y sus compósitos con óxido de grafeno (GO) y plata, para diseñar un filtro fotocatalítico de laboratorio para la desinfección de aire de interiores. Los materiales fueron caracterizados mediante varias técnicas, incluyendo microscopia electrónica de barrido–espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS), microscopia electrónica de transmisión (HRTEM), microscopia de fuerza atómica (AFM), espectroscopia infrarroja (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia UV-Vis con reflectancia difusa (UV-DRS), y área de superficie específica (S_{BET}).

La actividad microbicida de los materiales fue evaluada empleando *S. aureus* como organismo modelo. Los resultados mostraron que los compósitos con óxido de grafeno (GO) tenían una actividad bactericida superior a los materiales prístinos, lo que los convierte en buenos candidatos para sistemas de desinfección de aire. La seguridad del material se confirmó mediante pruebas de viabilidad celular con la línea celular de epitelio alveolar (A549), donde se demostró que concentraciones menores a 100 $\mu\text{g/mL}$ eran seguras.

Finalmente, se diseñó y fabricó un prototipo de filtro empleando los materiales sintetizados soportados en perlita, se evaluó en una clínica de estomatología. Este dispositivo logró eficiencias de remoción de microorganismos superiores al 90%, destacándose el BiOCl/GO con un 97% de desinfección.

ABSTRACT

Indoor air quality is a crucial issue for human health, contributing to respiratory diseases and “sick building syndrome”. The COVID-19 pandemic emphasized the need for effective indoor air disinfection systems. Current air purification systems are effective in the short term but do not completely control indoor air pollution. In this context, advanced oxidation processes (AOPs), such as heterogeneous photocatalysis, emerge as a promising solution.

This study focuses on the synthesis of photocatalysts based on bismuth oxyhalides (BiOX, where X = I or Cl) and their compounds with graphene oxide (GO) and silver, to design a laboratory-scale photocatalytic filter for indoor air disinfection. The materials were characterized by various techniques including scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), atomic force microscopy (AFM), infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), UV-Vis spectroscopy with diffuse reflectance (UV-DRS), and specific surface area analysis (S_{BET}).

The microbicidal activity of the materials was evaluated using *S. aureus* as a model organism. The results showed that graphene oxide (GO) composites had superior bactericidal activity to pristine materials, making them the best candidates for air disinfection systems. The safety of the material was confirmed by cell viability testing using the alveolar epithelial cell line (A549), demonstrating that concentrations below 100 $\mu\text{g/mL}$ were safe.

Finally, a filter prototype was designed and manufactured using the synthesized materials supported on perlite and evaluated in a dental clinic. This device achieved microorganism removal efficiencies greater than 90%, with BiOCl/GO standing out with 97% disinfection.

1. Marco teórico

1.1. Calidad de aire interior

El aire interior se refiere a ambientes interiores no industriales, por ejemplo, escuelas, edificios públicos, hospitales, viviendas particulares, entre otros. Generalmente, el flujo de aire es mínimo en estos establecimientos, y las personas suelen pasar una gran parte de su tiempo dentro de espacios (EPA, 2024; Karmakar et al., 2024). Es importante hablar de la calidad de aire interior debido al impacto directo que este tiene en la salud de los humanos. Desde los años 90, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado una serie de informes relacionados con la calidad del aire interior, en los cuales se abordan los factores ambientales y biológicos, tales como la ventilación, la humedad, la temperatura, las partículas derivadas de animales, el polen, los hongos, las bacterias y los virus, los cuales pueden generarse en el espacio o incluso ser introducidos desde el exterior (Kumar et al., 2021; WHO, 1990).

Derivado de la investigación sobre la calidad de aire de interiores, se ha introducido el término "síndrome del edificio enfermo" (SBS, por sus siglas en inglés). Este término fue propuesto por la OMS en 1983 desde entonces, miles de investigaciones literarias han sido publicadas en este campo (M. Wang et al., 2022). El SBS es el nombre que se le da al conjunto de síntomas de malestar que presentan las personas, comúnmente las personas que asisten a edificios que tienen mala calidad del aire, mala ventilación, y/o por partículas en suspensión. Los síntomas son muy diversos, desde malestares en las vías respiratorias, piel, ojos hasta enfermedades pulmonares que pueden ser más graves (Babaoglu et al., 2020; Martínez-Villalba et al., 2020).

Los problemas del SBS están directamente relacionados con la mala calidad del aire interior o contaminación interior, que se define como "la presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos en el aire de los espacios confinados que no está presente en el exterior de los sistemas ecológicos de alta calidad"; esta definición adquiere importancia en los temas de salud pública porque está relacionada a muchas enfermedades respiratorias, cutáneas, mucosas, etc. (Mirhoseini et al., 2020).

Las enfermedades respiratorias resultantes del SBS, suelen ser las más importantes en el área de la salud debido a que son muy diversas y en algunos

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

casos altamente graves. Dichas enfermedades, se han relacionado con la presencia de organismos patógenos presentes en el aire. (Bhardwaj, Bhardwaj, et al., 2021).

Al respecto, existen estudios que muestran las rutas más comunes de contagio de enfermedades respiratorias, en los que sobresale la transmisión aérea, indicando que es esencial mantener una buena calidad de aire en todo tipo de establecimiento especialmente los que se consideran como espacios cerrados (Bitew et al., 2021).

1.1.1. Aire de interior en hospitales

En hospitales, las infecciones nosocomiales se vuelven un problema difícil de controlar, los organismos transportados por aire, también conocidos como bioaerosoles, pueden provocar todo tipo de infecciones respiratorias incluso estar relacionadas con infecciones en pacientes con heridas abiertas por contaminación, o de mayor preocupación contagios a pacientes comprometidos inmunológicamente (Bitew et al., 2021; Büchner et al., 2021).

A lo largo de la historia, se han presentado diversos eventos del sector salud relacionados con los microorganismos aerotransportados, los cuales han provocado una gran cantidad de muertes derivadas de contagios masivos de bioaerosoles. La influenza estacional causa cada año de 290,000 a 650,000 muertes (WHO, 2019); la pandemia de gripe española mató entre 50 y 100 millones de personas a nivel mundial; la influenza tipo A (H1N1) generó 17,000 muertes, y el síndrome respiratorio agudo causó 700 muertes (Ahmadi et al., 2021). Por último, el evento provocado por el virus SARS-CoV-2, también conocido como COVID-19, superó los 7 millones de muertes alrededor del mundo (WHO, 2024).

Durante la contingencia provocada por COVID-19, los hospitales fueron uno de los principales focos de infección, no solamente por la presencia del virus, ya que existen algunos estudios que revelan que la contaminación en hospitales es elevada y resulta insalubre para los usuarios y el personal de salud, se ha relacionado con enfermedades del sistema respiratorio, tales como tos, flema, tos flemática y sibilancias en el personal de los hospitales, siendo los miembros

de laboratorios los que están más propensos a presentar algún síntoma respiratorio (Asadi et al., 2020; Nguyen et al., 2022; Veysi et al., 2019).

Existe poca información sobre la regulación de la cantidad de microorganismos en el aire en México, sobre todo en hospitales. Por ello, varios grupos de investigación han llevado a cabo estudios enfocados en determinar la concentración y el tipo de microorganismos presentes en los ambientes hospitalarios, con el fin de proponer estrategias para asegurar la salud de los usuarios. Aunque las investigaciones sobre la calidad de aire en hospitales son limitadas, la mayoría de ellas reportan concentraciones superiores a las recomendadas por la OMS de 100 UFC/m³ (Cao et al., 2022; WHO, 1990).

En México, se reportan concentraciones de 30 a 400 UFC/m³, en Portugal, de 12 a 933 UFC/m³, en Alemania hasta 250 UFC/m³, en Tailandia más de 700 UFC/m³. Estas variaciones dependen del área de atención del hospital. De los reportes revisados, los organismos en bioaerosoles que comúnmente destacan por su importancia clínica son *Escherichia coli*, *Enterobacter cancerogenus* y *Acinetobacter sp.* *Microsporium audouinii*, *Cladosporium oxysporum*, *Mucor ramosissimus*, *Alternaria arborescens* y *Cryptococcus albidus* (Abbasi et al., 2019; Bitew et al., 2021; Cabo Verde et al., 2015; C. Chen et al., 2021; Kausar et al., 2016; Maldonado-Vega et al., 2014; Onklay et al., 2020).

Por las investigaciones realizadas, la mayoría de las conclusiones indican que los hospitales son construcciones complejas, y tienen necesidades especiales, una alta cantidad de usuarios y requerimientos diferentes a otros lugares, operan de manera regular todo el año y por ello, todos los procesos de sanitización, descontaminación o desinfección deben considerar la relación con sus prestaciones y el objetivo de interrumpir lo menos posible la actividad médica (Babaoglu et al., 2020; Settimo et al., 2020).

Las clínicas hospitalarias, independientemente de su especialidad, son espacios cerrados donde se trata una gran cantidad de enfermedades. Por lo tanto, la carga de contaminantes biológicos y químicos suele ser muy elevada, lo que requiere la implementación de sistemas que aseguren una buena calidad de aire (Ibrahim et al., 2022).

1.1.2. Aire interior en transportes públicos

En la actualidad, debido a las actividades cotidianas de las personas, se requieren sistemas de transporte o movilidad pública, especialmente en las grandes ciudades, para facilitar el desplazamiento de la población de un punto a otro. Considerando los cambios demográficos actuales, el acceso al transporte urbano juega un papel fundamental en la vida cotidiana, ya que facilita el desplazamiento eficiente dentro de las ciudades. Por lo tanto, la movilidad debe ser un criterio esencial al evaluar la calidad de vida, no solamente en el tiempo de viaje, sino que también se debe evaluar la calidad de aire que se respira dentro del transporte (Ceder, 2021; Takano et al., 2023).

Los principios básicos de diseño y construcción de transportes urbanos en el mundo son dependientes de varios factores, tales como, económicos, sociales, políticos, tecnológicos y climáticos, lo que resulta en una gran cantidad de escenarios que ponen en riesgo la salud por los peligros biológicos existentes. Al ser espacios cerrados, la exposición a patógenos transportados por aire aumenta la preocupación por el riesgo elevado de contagio (Budzynski et al., 2021).

Los riesgos de contagio de enfermedades infecciosas en el transporte público, además de estar relacionados al ambiente cerrado (aire interior), la alta superficie de contacto que alberga a los microorganismos y la gran cantidad de pasajeros aumenta la posibilidad de que algunos pasajeros pueden ser infectados con algún tipo de microorganismo. Recordando que las principales rutas de transmisión de enfermedades son: transmisión por contacto, por dispersión o por contagio de organismos aerotransportados, en el transporte urbano se vuelve un gran problema grave y difícil de controlar por el aumento en el riesgo de infecciones (van der Heijden, 2021).

La movilidad es una necesidad social importante, la cual ha cambiado con los años, principalmente en los últimos debido a contingencia sanitaria provocada por COVID-19, las primeras medidas para prevenir los contagios fueron por desinfección y limpieza continua, desafortunadamente la situación empeoró y las medidas de algunos países fueron más drásticas llevando incluso a la suspensión del servicio (Czodörová et al., 2021).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Para evitar o disminuir el riesgo de contagio y mejorar la calidad de vida, se requiere de nuevas medidas de protección para que prevengan brotes epidémicos y ataques bioterroristas en la infraestructura del transporte público (Vlaskin, 2022a).

1.2. Tecnologías de desinfección de aire

Existen diversas técnicas de desinfección de aire que implican tecnologías variadas. Entre ellas, se destacan las tecnologías físicas, tales como la filtración y dilución mecánica, y las tecnologías avanzadas de oxidación donde sobresalen la desinfección por radiación ultravioleta (UV), la ozonización y, más recientemente, la fotocatalisis heterogénea aplicada a la desinfección de aire (Vlaskin, 2022b).

1.2.1. Filtración

La filtración es un proceso mecánico que representa una técnica simple para eliminar partículas en suspensión, consiste en una serie de membranas porosas que se encuentran en todos los sistemas de aire acondicionado (Bui et al., 2021). Estas membranas, también conocidas como filtros, pueden atrapar de forma eficaz partículas contaminantes de diversos tamaños, incluyendo microorganismos, eliminándolos de la circulación (Obitková et al., 2024). Existen diversos filtros con tamaños de poro específicos que logran diferentes grados de purificación. Generalmente, los sistemas de filtración contienen varias capas de filtros que retienen partículas de distintos tamaños, alcanzando hasta el 99% de pureza (Figura 1) (Kumar et al., 2023).

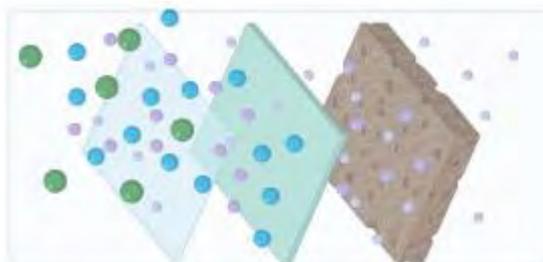


Figura 1. Sistema de filtración por membranas, paso y retención de partículas a través de los filtros. Modificada de: (G. H. Zhang et al., 2020)

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) son filtros de aire plegados que se acoplan a los sistemas de ventilación con el fin de reducir el número de partículas en el aire. Se utilizan principalmente en lugares donde es necesario aire limpio y controlado para proteger a los usuarios, además de eliminar los productos y los procesos de partículas finas que pueden trasladarse por corrientes de aire (Camfil, 2019).

Estos filtros suelen tener una alta efectividad, como lo demuestran varios estudios. Ewa y colaboradores (2019) comprobaron la eficiencia de los métodos de filtración en la remoción de microorganismos aerotransportados. En su estudio, se utilizaron sistemas de filtración basados en filtros HEPA, los cuales permanecieron encendidos durante 4 días en una semana, con las ventanas cerradas para evitar variables externas. Los resultados mostraron que al inicio se lograba una filtración (remoción) del 100%. Sin embargo, al finalizar el ciclo de 7 días, los filtros solo mantenían una eficiencia del 50% comparados con los muestreos sin utilizar filtros pasando de 1000 a 450 UFC/m³ (Bragoszewska et al., 2019).

La principal desventaja de los filtros se debe a que suelen saturarse rápidamente y deben ser reemplazados con frecuencia para mantener la eficiencia de purificación. El depósito de materia orgánica e inorgánica en los filtros contribuye a la proliferación de microorganismos, lo que puede afectar la calidad del aire y el funcionamiento del sistema de filtración. Además, algunos filtros electrónicos pueden producir partículas cargadas peligrosas, lo que puede dar lugar a la formación de ozono o derivados (Environmental Protection Agency EE. UU, 2019).

Los filtros HEPA se encuentran comúnmente instalados en los sistemas de ventilación y calefacción, donde se ve afectada directamente la transmisión de enfermedades por vía aérea debido a la reducción de partículas físicas, químicas y biológicas aerotransportadas. Se debe considerar en todo momento la tasa de intercambio de aire, la variación de temperatura y los cambios de humedad relativa. Todos los métodos de filtración deben estar acoplados a una fuente de radiación UV, es decir, utilizar sistemas complementarios (Kek et al., 2023).

1.2.2. Dilución o ventilación mecánica

La ventilación mecánica es una herramienta fundamental para mejorar la calidad de aire interior al introducir aire fresco del exterior y extraer el aire contaminado (Figura 2). Organismos como la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), el Instituto Americano de Arquitectos y el Centro de Control de Enfermedades (CDC) recomiendan tasas de ventilación específicas para garantizar un ambiente interior saludable. Estas recomendaciones varían según la calidad del aire interior, las actividades que se realizan en el espacio, el número de ocupantes, el volumen del área. Es importante destacar que, si bien la ventilación es esencial, en algunos casos puede ser necesario combinar esta estrategia con sistemas de filtración avanzados para eliminar ciertos contaminantes (Mousavi et al., 2021).

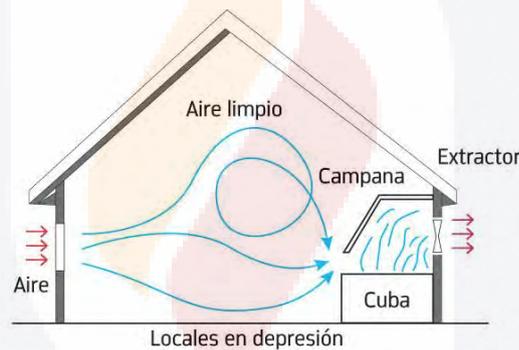


Figura 2. Esquema de dilución mecánica de aire de interiores (Torres Melgarejo & Barrantes Peña, 2014)

Derivado de las recomendaciones de diseño y construcción de edificios el Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción de Edificación (ONNCCE) desarrolla y establece las normas que contienen los parámetros de diseño de edificios, las condiciones necesarias para la circulación de aire con las cuales se logra evitar o prevenir la acumulación de contaminantes en espacios interiores.

La NMX-C-7730 (DOF, 2019) que tiene por título Industria de la Construcción-Ergonomía del ambiente térmico establece la determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices VME (voto medio estimado) y PEI (porcentaje estimado de insatisfechos) y los criterios de confort térmico local. Además, el proyecto de la norma mexicana PROY-NMX-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

C-577 “Industria de la construcción-calidad del ambiente interior-evaluación del diseño de la calidad del ambiente interior en proyectos de edificación” establece todos los parámetros, valores, documentación y metodologías que permiten evaluar la calidad del aire interior de una construcción a partir de las características del diseño descritas en el proyecto, con el fin de procurar el confort y la salud de los ocupantes (ISO, 2017).

1.2.3. Procesos avanzados de oxidación

Los PAO son prometedores en la actualidad para la desinfección del aire, se ha utilizado la fotocatalisis heterogénea y el diseño de reactores con características específicas para optimizar todo el proceso de desinfección. Esta tecnología, relativamente reciente, ha utilizado el dióxido de titanio como fotocatalizador activo bajo luz UV para ser aplicada en la degradación de contaminantes orgánicos en el aire (Escobedo & Lasa, 2020).

1.2.3.1. Luz ultravioleta

Las tecnologías de luz ultravioleta (UV) se han utilizado durante mucho tiempo es una excelente tecnología para la desinfección de bacterias y hongos debido a su alta eficiencia (D. K. Kim & Kang, 2018; She et al., 2020). La luz UV es parte del espectro electromagnético y emite energía radiante con longitudes de onda más cortas que las de la luz visible (Bhardwaj, Singh, et al., 2021; De Robles & Kramer, 2017).

La radiación UV es la radiación electromagnética con una longitud de onda de 100 – 400 nm (Figura 3), y se clasifica en tres bandas: UV-A, UV-B y UV-C. Los rayos provenientes del sol que alcanzan la superficie terrestre son mayormente de las bandas UV-A (95%) y de UV-B (5%), los cuales son dañinos para los humanos, ya que pueden causar cáncer de piel, cataratas e incluso supresión del sistema inmunológico. Por otro lado, los rayos UV-C (200-280 nm), emitidos por el sol son absorbidos por el oxígeno y el ozono en la atmosfera y, en general, no llegan a la superficie terrestre. Sin embargo, los pocos rayos UV-C que logran atravesar pueden dañar el ADN a través de mecanismos como la foto-hidratación, foto-dimerización y foto-cruzamiento (Correa et al., 2020; Memarzadeh, 2021).

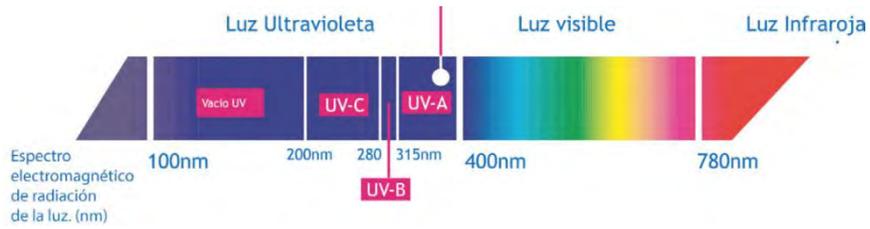


Figura 3. Espectro electromagnético de radiación de la luz (nm). (tomada de: (PROEMISA, 2020)

El estudio de la energía UV para la desinfección ha sido principalmente investigada y aplicada en superficies, es empleada como parte del tratamiento de agua, y en los últimos años se ha potenciado su uso en la desinfección de aire. Los primeros reportes en desinfección de aire fueron publicados por Wells y Wells (1936) y por Koller (1939), donde el primer grupo describe los mecanismos de permanencia de microorganismos en el aire y posibles mecanismos de infección, el segundo grupo describe los estudios realizados con el uso de lámparas de UV para la desinfección de *Bacillus* en forma de aerosol en cortos periodos de tiempo.

El mecanismo de desinfección UV consiste en la transferencia de energía electromagnética generada por una lámpara que emite en longitudes de onda UV hacia material genético (ADN o ARN) de los microorganismos. La radiación penetra las paredes celulares causando daño interno e impidiendo la reproducción de la célula (EPA, 2000; Ou & Petersen, 2021).

Además, cuando una longitud de onda de la luz incidente penetra una célula patógena, las moléculas internas cambian su estructura electrónica y se convierten generalmente en moléculas más reactivas, eso implica que los fotones pueden directamente interactuar con las moléculas de un patógeno y en consecuencia destruyéndolo y por lo tanto llevar a cabo la desinfección del aire (Spicer, 2021a).

Por lo tanto, un sistema de desinfección de aire resulta ser un mecanismo relativamente sencillo de instalar ya que se suele acoplar a sistemas de ventilación o recirculación de aire en los edificios cerrados (Figura 4). Por ejemplo, los sistemas HVAC (Heating – Ventilation - Air conditioning) se han utilizado por muchos años con buenos resultados, es una tecnología prometedora que ha demostrado que puede reducir la carga biológica y la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

incidencia de enfermedades derivadas de la mala calidad de aire interior (Memarzadeh, 2021).

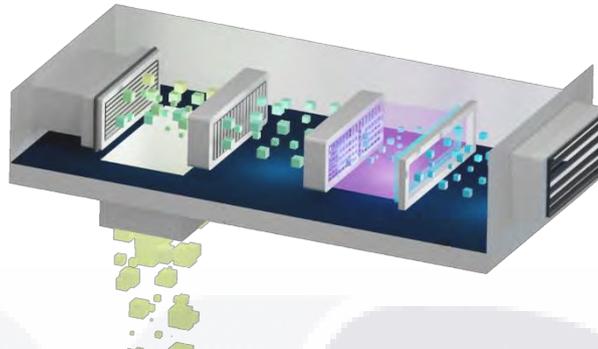


Figura 4. Sistema de ventilación HVAC acoplado con luz UV. (modificado de: (Spicer, 2021b))

También se ha investigado el uso de UV-vacío, la cual es una fuente de luz prometedora presentando las ventajas de tiempos de irradiación cortos (0,004–0,125 s) para desinfectar el aire y degradar el ozono generado con flujo continuo y altas tasas de flujo (J. Kim & Jang, 2018).

Una de las principales desventajas del uso de UV es que produce ozono, debido a la presencia de oxígeno en el aire, el ozono puede causar efectos adversos en los ojos, la piel y el tracto respiratorio en humanos. Por esta razón, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) recomienda que las lámparas UV-C que emiten ozono no deben utilizarse en locales cerrados sin ventilación (Memarzadeh, 2021).

Conociendo las ventajas y limitaciones de la tecnología UV, varios autores recomiendan no utilizar este método como única solución de desinfección. En su lugar, sugieren que se acople a otros sistemas de tratamiento de aire como filtración, ventilación mecánica, control de presión diferencial. El acoplamiento de la tecnología UV en los ductos de ventilación es la configuración más común, ya que permite una desinfección más completa y eficiente del aire en circulación (Graeffe et al., 2023; Leung & Chan, 2006).

1.2.3.2. Ozonización

La ozonización es un PAO en el cual se producen especies de oxígeno altamente reactivas. El ozono es un gas formado por tres átomos de oxígeno, es un oxidante muy potente, se considera una sustancia peligrosa con efectos graves

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a la salud causando la muerte si se inhala, puede provocar quemaduras y daños a la piel, los ojos y otros órganos como los pulmones, por lo cual el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSSAT) ha establecido límites de exposición máxima de 0.1 ppm en 8 h (Ministerio de Trabajo y Economía Social, 2020).

Los sistemas de ozonización utilizan el ozono, el cual tiene una acción fungicida y desodorante, destruyendo con gran rapidez todos los gérmenes y alérgenos que circulan por el aire, interrumpe el metabolismo de los patógenos y por lo tanto se destruyen. Es una tecnología compleja y requiere equipos complicados, pero es muy eficiente, sin embargo, como ya se mencionó el gas es muy irritante y posiblemente tóxico, además es reactivo y corrosivo por lo que requiere personas bien capacitadas para poder implementar su uso (EPA, 2000; Ou & Petersen, 2021).

Además, existe evidencia que sugiere que el ozono puede afectar la propagación de SARS-CoV-2. Los estudios mostraron que niveles mayores a $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozono y una humedad relativa inferior al 49% afectaron negativamente la propagación de casos por COVID-19, en una Ciudad de China en particular (Ministerio de Trabajo y Economía Social, 2020).

1.2.3.3. **Fotocatálisis**

La fotocatalisis es una técnica eficiente que utiliza fotones de luz y materiales semiconductores bajo condiciones de reacción ambiental con el fin de activar la degradación de contaminantes orgánicos (Escobedo & Lasa, 2020).

La actividad fotocatalítica depende de las propiedades del material semiconductor. Un fotocatalizador absorbe suficiente energía que es igual o superior a la energía del *band gap* para excitarse. La absorción de la luz provoca que los electrones de la banda de valencia (BV) se exciten y se promuevan hacia la banda de conducción (BC), generando huecos en la BV y un electrón de alta energía en la BC (Hassaan et al., 2023; Nevárez Martínez et al., 2017). Los huecos y los electrones generados (par electrón-hueco) se les denomina excitones, que reaccionan con moléculas de agua y oxígeno o grupos hidroxilos para generar especies de oxígeno altamente reactivas, como por ejemplo, el anión superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) y el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) que posteriormente son los

responsables de llevar a cabo la degradación de compuestos orgánicos mediante reacciones de tipo redox (X. Bai et al., 2024; Delsouz Khaki et al., 2018; Martin et al., 2015). Los mecanismos de reacción y la representación gráfica del semiconductor se ilustran en la Figura 5.

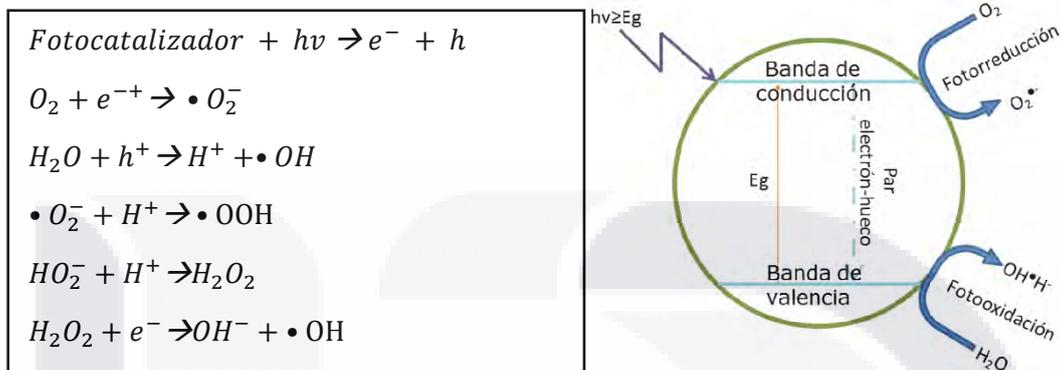


Figura 5. Representación gráfica del par electrón-hueco de un semiconductor. (Martínez-Montelongo et al., 2016)

La fotocatalisis resulta ser una técnica muy efectiva para la degradación de contaminantes, pero se debe tener en cuenta a los componentes necesarios para el proceso: el fotocatalizador (semiconductor de banda ancha), el oxidante (generalmente H_2O_2 , ayuda al inicio del proceso de fotocatalisis), el reductor (agente donador de electrones) y la radiación (longitud de onda necesaria por el fotocatalizador) (Bermejo, 2018; Khader et al., 2024).

Al respecto, el premio Nobel de química en 2001, Ryōji Noyori, hizo hincapié en que existe la necesidad de sintetizar materiales con un 100% de rendimiento y buena selectividad con el fin de evitar grandes cantidades de residuos, además de explorar más la fotocatalisis y las transformaciones que por otro método son energéticamente no viables (González, 2018). Debido a esas necesidades se han realizado investigaciones de fotocatalizadores que cumplan en mayor medida estas necesidades.

1.2.4. Fotocatalizadores

W. Ostwald (1902) define un catalizador como “un elemento que aumenta la velocidad de una reacción a la que se adiciona y no se considera en la reacción”. Un fotocatalizador funciona de manera similar, pero recibe radiación solar o

artificial de una longitud de onda específica para excitar sus partículas (Bermejo, 2018).

El fotocatalizador es un material semiconductor capaz de acelerar la velocidad de las reacciones de oxidación o de reducción. El semiconductor de banda ancha produce un par “electrón-hueco” el cual puede producir especies altamente oxidantes, el anión superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) y el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), por lo cual tiene una gran capacidad de mineralizar y neutralizar los contaminantes en general (Bermejo, 2018).

La energía necesaria para impulsar a los electrones de la BV a la BC del semiconductor se denomina “band gap”. La Figura 6 muestra la posición de los bordes de la banda de algunos materiales que se han estudiado en procesos fotocatalíticos, dicho valor es importante para determinar la cantidad de energía que será necesaria para que el semiconductor pueda ser activado, es decir, se requiere del valor de *band gap* o superior para lograr activar un proceso fotocatalítico (Aguirre Cedillo, 2019).

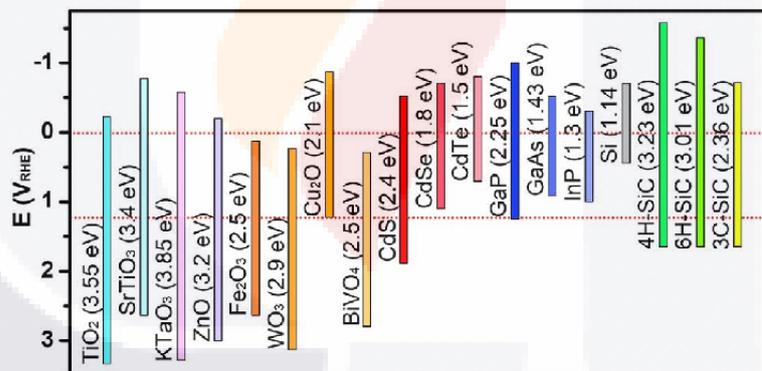


Figura 6. Diagrama energético para las bandas de conducción y valencia de los diferentes semiconductores. (Jian & Sun, 2020)

Existe una gran variedad de materiales semiconductores que han sido estudiados como fotocatalizadores, cada uno de ellos presenta diversas propiedades, como band gap, tamaño de partícula, etc., Algunas investigaciones se han especializado en describir las propiedades de los semiconductores como fotocatalizadores en la desinfección, purificación de aire o agua. Uno de los fotocatalizadores más utilizados y estudiados es el dióxido de titanio, que ha sido empleado para degradación de contaminantes orgánicos y biológicos, aunque este presenta un inconveniente que es la necesidad de luz UV para su activación,

por lo cual se recurre al dopado del mismo con algún metal que permita la reducción del ancho de banda y que pueda ser activado con luz visible (Aguirre Cedillo, 2019).

Por otro lado, existen materiales menos estudiados como semiconductores, tal es el caso de los semiconductores a base de bismuto (BiOX , $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$). Este material ha atraído un gran interés por su conjunto de propiedades únicas, presenta masas efectivas muy pequeñas, amplia longitud de onda Fermi, alta movilidad de portadores y una energía de superposición de banda muy baja (X. Dong et al., 2023).

1.3. Semiconductores

Existen dos tipos de semiconductores: los intrínsecos y los extrínsecos. Los intrínsecos incluyen materiales como el silicio y el germanio, que son ampliamente utilizados en electrónica, mientras que los semiconductores extrínsecos son principalmente óxidos metálicos, comúnmente empleados en fotocatalisis. En los materiales semiconductores intrínsecos, el número de electrones y huecos de conducción es el mismo, y el nivel de Fermi está situado entre las bandas de valencia y de conducción del material (Rocha Juan Carlos & Llanes Edilberto Antonio, 2020).

Los semiconductores extrínsecos contienen impurezas o dopantes que pueden modificar la estructura de bandas de valencia y de conducción del material hospedero. El semiconductor dopado con átomos aceptores de electrones se conoce tipo "p" que genera un exceso de huecos en la estructura del material. Los semiconductores dopados con impurezas donantes de electrones son tipo "n", donde existe un exceso de electrones en el material (Figura 7).

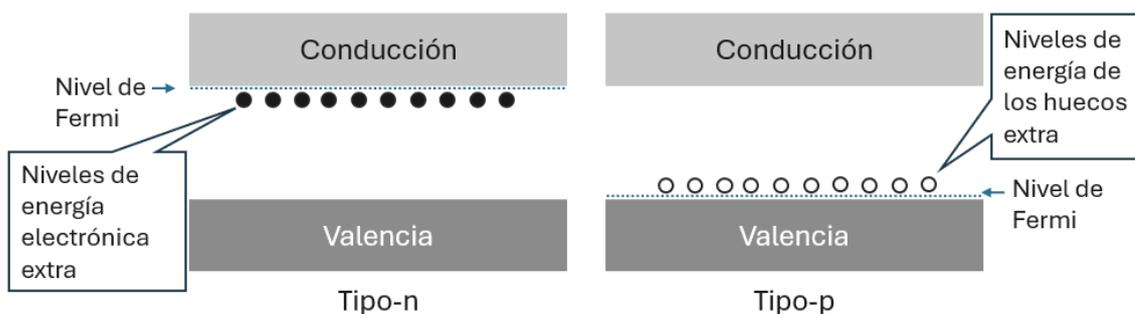


Figura 7. Representación de los semiconductores tipo "n" y tipo "p" (Flores Cardona, 2022)

1.4. Nanomateriales

La Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) define al prefijo nano referente al tamaño entre 1 y 100 nm, en la Figura 8 se muestra una comparación de diversos tamaños de la materia, de la cual las bacterias y hongos llegan a tener tamaños de 0.5 a 5 μm mientras que los virus y las moléculas de ADN se encuentran en diámetros nanométricos.

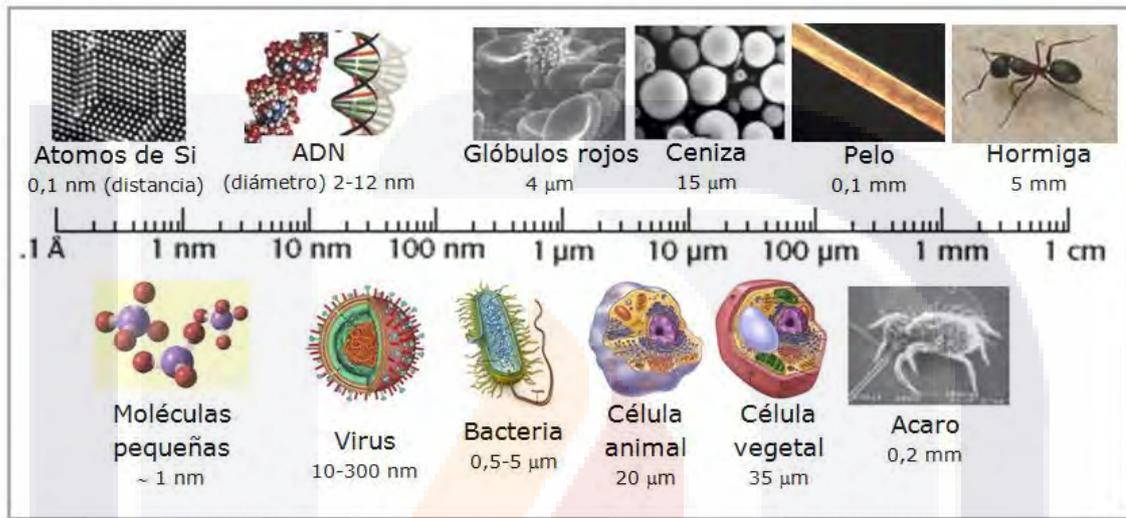


Figura 8. Representación de la escala nanométrica y micrométrica (Staff, 2015)

Los primeros estudios en el campo de la nanotecnología fueron realizados por el científico Richard Feynman, quien en 1959 realizó una charla en la Sociedad Estadounidense de Física titulada "Hay mucho espacio en el fondo: una invitación para ingresar a un nuevo campo de la física". Sin embargo, no fue hasta 1974 que se empleó el término nanotecnología, la cual hacía referencia a los materiales que presentaban tamaño nanométrico con acabado de semiconductores los cuales estaban aplicados en nano-ingeniería (Dolez, 2015; Forgione, 2022; Sánchez Moreno, 2017). Por otro lado, el estudio de los materiales a escala nanométrica se ha apoyado en la actualidad de diversos microscopios que ayudan a la observación, descripción y caracterización de las partículas tamaño nanométrico.

1.5. Partículas semimetálicas

Al comparar las propiedades ópticas de las nanopartículas (NPs) metálicas a escalas nanométricas y a escalas en bultos, se puede ver que tienen

comportamientos completamente diferentes, su forma y su tamaño brindan propiedades de esparcimiento y absorción de luz únicas.

Los metales nobles plasmónicos han sido estudiados y desarrollados como posibles fotocatalizadores, teniendo bien descritos sus plasmones de absorción, sin embargo, los metales no nobles plasmónicos han capturado la atención de los investigadores debido a sus potenciales aplicaciones en la fotocatalisis, debido a la utilización de la energía lumínica (R. Li et al., 2023; Zhou et al., 2017). Algunas NPs nobles de cobre, oro, plata junto con sus aleaciones presentan propiedades únicas por su fuerte interacción con la luz en el rango visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Son también conocidos como NPs plasmónicas, ya que absorben la luz de forma eficiente gracias a las oscilaciones colectivas de los electrones de conducción (Negrín Montecelo, 2021).

La existencia de electrones libres en la BC de la superficie de las NPs metálicas que son irradiadas con un haz de luz, provoca la excitación colectiva de los electrones libres, por lo que se produce una oscilación coherente deslocalizada de los electrones confinados en la superficie de las NPs metálicas, en la interfaz metal-semiconductor. La excitación electromagnética producida por este efecto se conoce como polaritón del plasmón de superficie; este se refiere a la cuasipartícula híbrida que resulta del acoplamiento entre la luz y los electrones de la superficie. Para determinadas frecuencias, se produce un acoplamiento entre las frecuencias y la oscilación del polaritón; este fenómeno se llama resonancia del plasmón de superficie (T. Kong et al., 2024; Sánchez Moreno, 2017).

1.5.1. Bismuto

El bismuto fue aislado por primera vez en 1753, es un metal de bajo costo, no tóxico que tiene algunas propiedades físicas nobles. Es el metal más diamagnético y exhibe un plasmón de resonancia superficial, por lo cual se puede comportar de manera similar a los metales nobles (Au, Ag, Pt, etc.) (Morales Ramos et al., 2022). El sólido se encuentra en forma de cristales romboédricos pero en forma de metal fundido reduce su volumen, resiste bien la oxidación en condiciones ambientales, pero si se calienta a altas temperaturas,

reacciona con el O_2 y el H_2O para generar el óxido característico de color amarillo, Bi_2O_3 (Arsuaga, 2019).

Este metal se puede encontrar en la naturaleza en forma libre y en forma de sales minerales, sus compuestos más comunes son el carbonato de bismuto (bismutita) y el doble sulfuro de bismuto y telurio (bismutinita). Es una partícula poco estudiada, pero tiene varias aplicaciones en metalurgia para la fabricación de aleaciones en soldadura, en sistemas de seguridad para detección de incendios y para la fabricación de hierro maleable; existen registros de que ha actuado efectivamente en compuestos fotocatalíticos excitados con luz visible, su naturaleza permite que sea utilizado directamente como semiconductor, catalizador o simplemente para optimizar el comportamiento fotocatalítico de otros materiales (L. Zhang et al., 2021). El óxido, hidróxido, oxiclورو, tricloruro y nitrato de bismuto también son utilizados en cosmética (Nordberg et al., 2001). Los compuestos de bismuto se han utilizado durante mucho tiempo para el tratamiento de enfermedades, tales como, sífilis, hipertensión, infecciones, afecciones de la piel y trastornos gastrointestinales (van der Heijden, 2021).

En los últimos años, el bismuto ha llamado la atención de investigadores por sus propiedades de adsorción, utilizándolo para la eliminación de contaminantes, removiendo exitosamente especies aniónicas, cationes metálicos, colorantes sintéticos y otras moléculas orgánicas. Gracias a las características que presentan los materiales de bismuto, se han utilizado como catalizadores plasmónicos en forma de $Bi/(BiO)_2CO_3$, $Bi/g-C_3N_4$, Bi/TiO_2 y $Bi/BiOCl$ reportando una mejora en el rendimiento fotocatalítico gracias a la sinergia de los componentes (M. Chen et al., 2020; X. Li et al., 2017).

1.5.1.1. Oxi-halogenuros de Bismuto

De los óxidos múltiples de bismuto, los bismuto-titanatos son una familia que incluye unidades de Bi_2O_3 y TiO_2 . Los de mayor aplicación en fotocátalisis son $Bi_4Ti_3O_{12}$, $Bi_2Ti_2O_7$ y $Bi_{12}TiO_{20}$. Las estructuras cristalinas son poliedros conectados de BiO_n y TiO_n con diferentes valores de n (Figura 9). La BV y la BC se modifican para dar una brecha de banda más estrecha de 2,5 a 2,8 eV, lo que indica que serán excitados con luz visible para actividad fotocatalítica (M. Chen et al., 2020; He et al., 2014).

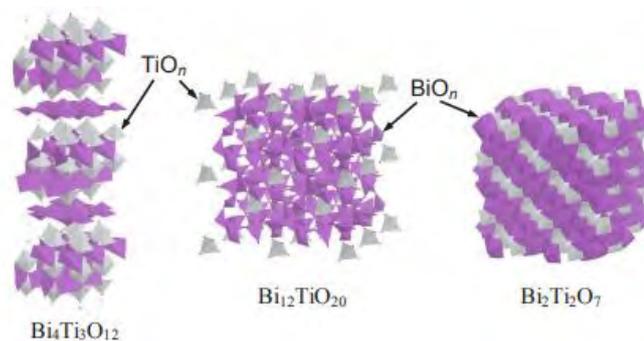


Figura 9. Estructuras cristalinas del bismuto-titanio.(He et al., 2014)

Los oxi-halogenuros de bismuto (BiOX) se cristalizan en estructuras con simetría tetragonal. Se trata de una estructura laminar conformada por placas $[\text{X-Bi-OBi-X}]$ apiladas por interacciones de Van Der Waals. El ordenamiento estructural considera a cada átomo de bismuto rodeado por cuatro átomos de oxígeno y cuatro átomos de halógeno (Flores Cardona, 2022).

1.5.1.2. **Fotocatálisis con semiconductores basados en bismuto.**

Los fotocatalizadores más comunes a base de bismuto son sulfuro de bismuto, óxidos múltiples y óxidos de halógenos donde el bismuto está presente como Bi^{3+} , por lo cual los orbitales tienen una configuración adecuada para aumentar la actividad fotocatalítica disminuyendo el band gap y facilitando la absorción de la luz visible (L. Zhang et al., 2021).

El oxyoduro de bismuto (BiOI) es un compuesto amarillo rojizo, no tóxico, con propiedades de fotocatalizador relativamente novedoso y prometedor, debido a que presenta un ancho de banda bajo (2.17 eV), lo que permite la activación con luz visible y actividades fotocatalíticas sobresalientes en la degradación de diversas moléculas orgánicas (Flores Cardona, 2022).

El oxiclورو de bismuto (BiOCl) es un compuesto inorgánico sólido, no tóxico, de color blanco, tiene un amplio uso en la industria cosmética y en el campo científico para dispositivos electrónicos, fotovoltaicos y como fotocatalizador. Debido a su band-gap se encuentra en 2.8 eV, sólo presentan una alta actividad con irradiación UV, por lo tanto, se ha propuesto la modificación de BiOCl , mediante dopaje o compósitos (Puttaraju et al., 2022; Sánchez Rodríguez, 2020; Sánchez Rodriguez et al., 2015).

1.6. Decoración con grafeno

El grafeno es un material con estructura bidimensional el cual se encuentra en forma de nano-placas de láminas formadas por átomos carbono con hibridación sp^2 conectados en una estructura de red hexagonal. Presenta dureza muy elevada, gran elasticidad, alta flexibilidad y densidad. Además de altas conductividades térmicas y eléctricas; por lo que tiene diversas aplicaciones en sensores, baterías, supercondensadores, celdas solares y celdas de combustibles (Luis García-Bello, 2023).

Por otro lado, el grafeno es altamente resistente a las radiaciones ionizantes debido a su excelente movilidad de electrones. En el campo de la fotocatalisis, los semiconductores que incorporan grafeno han adquirido popularidad, ya que la efectiva separación de cargas y la elevada área superficial lo convierten en un material ideal para el soporte de nanomateriales. La adición o decoración de semiconductores con óxido de grafeno modifica el comportamiento de los electrones en los fotocatalizadores, debido a que puede funcionar como receptor de electrones, reduciendo la recombinación entre el par electrón-hueco, lo que resulta ser una estrategia para aumentar la actividad fotocatalítica (Flores Cardona, 2022; Sánchez Rodríguez, 2020).

El óxido de grafeno (GO) se puede obtener a partir del grafito en solución, donde se rompen enlaces de Van Der Waals y se generan defectos estructurales en la red de carbono, formándose una especie intermedia con alta densidad de grupos funcionales de oxígeno. El GO tiene la capacidad de mantener estables durante periodos prolongados, lo cual es fundamental en la formación de nanocompuestos combinados con otros materiales, tales como polímeros, biomoléculas o NPs (Rodríguez-González et al., 2023; Siqueira & Oliveira, 2017). El óxido de grafeno reducido (rGO) por su parte puede ser obtenido mediante procesos químicos o térmicos a partir de GO, donde la reducción fotocatalítica se encuentra dentro de los procesos químicos. La incorporación de estos materiales en procesos fotocatalíticos y su eficiencia esta descrita en numerosos estudios sobre la inhibición microbiana de derivados del grafeno, como el óxido de grafeno o el óxido de grafeno reducido. Algunas propiedades importantes de estos derivados se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa entre las propiedades de GO y rGO

GO	rGO
<p>Tiene grupos funcionales (como carboxilos, hidroxilos y epóxidos) que lo hacen soluble en agua y otros solventes polares. Esto facilita su manipulación y procesamiento en soluciones.</p>	<p>Tiene menos grupos funcionales oxigenados, lo que restaura parcialmente la red de carbono conjugada y mejora significativamente su conductividad eléctrica</p>
<p>Es más sencillo de sintetizar que rGO, ya que no requiere procesos adicionales de reducción, lo que reduce costos y simplifica su producción.</p>	<p>Tiene mayor resistencia y elasticidad comparado con GO, lo que lo hace adecuado para aplicaciones estructurales y mecánicas.</p>
<p>GO contribuye a la generación de especies como $\bullet\text{OH}$ y O_2^-, esenciales para la degradación de contaminantes.</p>	<p>rGO tiene una red de carbono más restaurada, lo que mejora el transporte de electrones hacia el catalizador principal y reduce la recombinación de pares electrón-hueco</p>
<p>Los grupos oxigenados en GO atrapan electrones, reduciendo la recombinación de pares electrón-hueco, lo que aumenta la eficiencia fotocatalítica.</p>	<p>rGO presenta un <i>band gap</i> más estrecho que le permite absorber luz visible, haciéndolo más eficiente en aplicaciones con iluminación solar.</p>

1.7. Dopaje con Plata

Las NPs de plata, al igual que otros metales, tienen diversas propiedades biológicas, ópticas, magnéticas, eléctricas y catalíticas, mismas que están relacionadas con su tamaño, forma, composición, cristalinidad y estructura. Las NP de plata por su tamaño relativamente pequeño y su alta relación superficie-volumen, presentan diferencias químicas y físicas en sus propiedades en comparación con sus contrapartes a granel, pueden exhibir capacidades antimicrobianas adicionales que no ejerce la plata iónica (Altammar, 2023).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

El mecanismo de acción antimicrobiano estudiado menciona que las NPs de plata pueden adherirse a la membrana celular y penetrar al interior de la bacteria, donde interactúan con las proteínas y compuestos que contienen fósforo como el ADN, una vez dentro, las NPs forman una región de bajo peso molecular en la que la bacteria se conglera, protegiendo así el ADN de los iones de plata, las NPs atacan la cadena respiratoria conduciendo a la muerte celular, a su vez, las NPs liberan iones de plata, lo que potencia su actividad bactericida (Barabadi et al., 2022).

La plata como dopante de un fotocatalizador, es ventajosa porque facilita la transferencia de carga entre un semiconductor y NPs de Ag metálica, mejora la separación de electrones-huecos, debido a la excelente conductividad y su capacidad de atrapar electrones (Y. Kong et al., 2024). Las NPs de Ag presentan el efecto de resonancia de plasmón superficial localizada (LSPR) al irradiarse con luz visible, por lo que es un excelente candidato como dopante en procesos fotocatalíticos (Pham et al., 2021; Wei et al., 2014).

1.8. Reactores para la desinfección de aire

La mayoría de los procesos estudiados para la desinfección de aire se han llevado a cabo a escala laboratorio, se han desarrollado varios prototipos fotocatalíticos empleando diversos materiales y fuentes de luz, la mayoría son a base de reactores empacados y acoplados a sistemas de ventilación comerciales, sin embargo, cuando se pretende escalar estos procesos a nivel comercial es algo complejo (Hassaan et al., 2023).

Los reactores fotocatalíticos para desinfección de aire muestran diversas formas, por ejemplo, tangencial, de panel, de placa y anular. Algunos resultados de estos se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Reactores para la desinfección de aire.

Geometría	Material	Soporte	Irradiación	Eficiencia	Ref.
Lecho empacado	AgNPs@CS-TiO ₂	Quitosano	UV	97%	(Y. C. Chen et al., 2019)
Lecho empacado	TiO ₂ P25	Quitosano	Luz UV	93%	(Lekshmi Mohan et al., 2019)
Reactor de membrana	ZnIn ₂ S ₄	Fluoruro de polivinilideno	UV-Vis	>90%	(T. Liu et al., 2020)
Reactor anular	TiO ₂ P25	Anillos de vidrio	Luz UV	96%	(Zacarías et al., 2021)

Los resultados que sobresalen en los estudios de reactores para el diseño de filtros de aire indican el aumento del área de superficie y las propiedades de transferencia de masa, debido a que estas pueden mejorar la capacidad de desinfección al proporcionar grandes sitios de interacción para patógenos (Ahmadi et al., 2021; Haghghatmamaghani et al., 2019).

Actualmente el diseño de reactores usados en desinfección de aire, se enfocan en la búsqueda de valores óptimos para los diferentes parámetros que afectan el proceso de oxidación, tales como: pH, temperatura, diseño del reactor, naturaleza y concentración del contaminante, y agentes oxidantes que puedan mejorar la reacción (Alalm et al., 2021).

1.9. Diseño de reactores

El diseño de reactores de desinfección de aire es crucial para aplicaciones donde se necesita eliminar o inactivar microorganismos patógenos, contaminantes o compuestos orgánicos volátiles (COVs) del aire en ambientes controlados, como hospitales, laboratorios, edificios comerciales y sistemas de ventilación en diversas industrias. Los métodos comunes incluyen la utilización de luz ultravioleta (UV), ozono, filtros HEPA, y PAOs.

Para el diseño de reactores fotocatalíticos con aplicación en desinfección de aire deben ser considerados ciertos parámetros de diseño de reactores, tales como, el material fotocatalítico, el área de soporte para el material, el diseño geométrico del reactor, la luz emitida que generará la energía de activación, el flujo de aire y la carga microbiana en el aire (Escobedo & Lasa, 2020).

Velocidad del Flujo: Es crucial optimizar la velocidad del flujo de aire en el reactor para garantizar que haya suficiente tiempo de contacto entre el aire contaminado y el agente desinfectante, ya sea radiación UV, ozono o un filtro físico.

Tiempo de Residencia: El diseño debe considerar el tiempo de residencia necesario para asegurar que los microorganismos o contaminantes sean efectivamente eliminados o inactivados.

Materiales de Construcción: Se debe considerar un material resistente a la corrosión, daños físicos o desgaste rápido.

Resistencia a la Corrosión: Los materiales utilizados en el reactor deben ser resistentes a la corrosión, especialmente en reactores que emplean ozono o PAOs, donde los oxidantes pueden atacar componentes del reactor.

Modelos Cinéticos: En sistemas que emplean PAOs, los modelos cinéticos pueden ayudar a predecir las tasas de desinfección y degradación de contaminantes.

1.9.1. Reactores de lecho empacado

En este diseño la corriente de aire debe fluir y ser dirigida a través de un lecho empacado, donde el contaminante entra en contacto con el sistema fotocatalítico que contiene las partículas irradiadas. Es un sistema ampliamente utilizado en la purificación de aire en los sistemas comunes, sin embargo, esta configuración presenta la desventaja de tener una baja relación área superficial/volumen del reactor y por consiguiente un bajo uso de la irradiación, considerando tanto la absorción como la dispersión de la luz (Alalm et al., 2021; Herrmann & Puzenat, 2015).

2. ANTECEDENTES

A partir de la pandemia causada por COVID-19, varios grupos de investigación desarrollaron tecnologías de desinfección y purificación de aire con el fin de aumentar la calidad de aire de interiores. A continuación, se presentan algunos estudios que determinaron las bases del desarrollo de esta tecnología de desinfección de aire.

Dong y colaboradores (2014) demostraron el uso de bismuto para la remoción de NO mediante fotocatalisis. Este estudio mostró una efectiva actividad fotocatalítica bajo irradiación de 280 nm, mientras que para longitudes de onda de 360 y 420 nm la actividad fue nula, indicando que esa energía era insuficiente para activar el bismuto. Una de las observaciones más importantes de este estudio fue que el catalizador permaneció activo por un tiempo prologando, incluso después de suspender la irradiación, dicho fenómeno fue definido como "memoria" catalítica (F. Dong et al., 2014b).

El grupo de Zhou (2017) sintetizó películas de bismuto, depositadas en sustratos de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) mediante un método de pulverización catódica con magnetrón. En este trabajo, demostraron una mejora en las características de la fotocatalisis, observando un incremento en el campo magnético y un desplazamiento en la localización de los picos de resonancia plasmónica, la cual se hizo más fuerte y fue correlacionada con el tamaño de las partículas de bismuto (Zhou et al., 2017).

En el ámbito de la desinfección, K. Li y su equipo diseñaron nanoesferas de bismuto y nanocompuestos de bismuto/grafeno. La actividad antibacteriana fue evaluada empleando *E. coli* como organismo de referencia y aplicando plasmones asistidos por UV, obteniendo resultados que mostraron una eficiencia de desinfección fotocatalítica significativamente mayor en los compósitos de grafeno en comparación con las nano-esferas de bismuto (K. Li et al., 2018).

Chen y colaboradores (2019) y Bono y colaboradores (2021) han desarrollado sistemas que emplean la fotocatalisis heterogénea usando TiO₂ puro o dopado con diversos metales para aumentar la eficiencia de desinfección. Los resultados de estos sistemas han logrado una desinfección del 90% de organismos biológicos con el uso de TiO₂ puro que bajo irradiación de luz UV. El dopaje de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

TiO₂ puede disminuir el band gap permitiendo el uso de luz visible sin afectar los resultados en la desinfección (Bono et al., 2021; Y. C. Chen et al., 2019).

Yen-Chi Chen y colaboradores (2019) diseñaron un compuesto con plata cero-Valente con titanio y quitosano (AgNPs@CS-TiO₂) para evaluar su actividad microbiológica. Este compuesto fue sintetizado por depósito químico, y la caracterización del material reveló diámetros de 6.69 a 8.84 nm. La aplicación principal de este material fue la desinfección de aire; los nanocompuestos se instalaron en un sistema de ventilación en salas de un hospital. El sistema presentó una eficiencia de remoción del 88% de bacterias y del 97% de hongos, logrando estas reducciones en solo 30 min de funcionamiento del sistema de ventilación (Y. C. Chen et al., 2019).

Wang y colaboradores desarrollaron NPs metálicas de bismuto depositadas en laminillas de InVO₄, obtenidas por síntesis hidrotérmica. El desempeño fotocatalítico se evaluó a través de la fijación de nitrógeno en condiciones normales, encontrando que el uso óptimo se alcanzaba al 5%, lo que incremento la generación de NH₄ en comparación con el InVO₄ puro. Este incremento se atribuyó al plasmón de resonancia superficial, el cual mejora la absorción de luz y facilita la transferencia de electrones. Además, el estudio destacó que las NPs de bismuto actuaron como sitios activos adicionales, favoreciendo las reacciones redox esenciales para la fijación de nitrógeno. Estas mejoras sugieren que los materiales híbridos basados en bismuto pueden ser prometedores para aplicaciones en la conversión de energía solar y procesos catalíticos sostenibles (Vargas et al., 2024; J. Wang et al., 2020).

Zacarías y colaboradores (2021) diseñaron un sistema fotocatalítico para la remoción de microorganismos en un reactor anular con vidrios recubiertos de TiO₂. El diseño incorporó lámparas de UV-A en el interior para la activación fotocatalítica. El dispositivo fue evaluado en términos de filtración e inactivación de microorganismos presentes en el aire, determinando que el tiempo de irradiación es un factor crítico en la eficiencia del proceso. Los resultados mostraron una reducción del 66% de los microorganismos con una hora de irradiación, alcanzando una reducción del 99% tras 8 horas de irradiación. Además, se observó que el aumento en el tiempo de exposición no solo mejoró la eficiencia de inactivación, sino que también contribuyó a una mayor estabilidad

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

en el rendimiento del sistema. Este estudio sugiere que los sistemas fotocatalíticos, cuando se optimizan adecuadamente, pueden ser soluciones efectivas para la purificación del aire en entornos cerrados, como hospitales y laboratorios, donde el control de la calidad del aire es fundamental (Zacarías et al., 2021).

Por su parte, el grupo de Kareem (2022) llevó a cabo la síntesis de NPs de Bi_2O_3 y realizó un estudio de sus propiedades ópticas y estructurales. Este trabajo se centró en evaluar la actividad antibacteriana de las NPs Bi_2O_3 contra biopelículas formadas por dos bacterias relevantes: de *A. baumannii* y *S. aureus*. Los resultados mostraron que las NPs poseen una notable capacidad antibacteriana, con CMI de 120 $\mu\text{g}/\text{mL}$ para *S. aureus* y 64 $\mu\text{g}/\text{mL}$ para *A. baumannii*. Además, las NPs demostraron eficacia en la inhibición de la formación de biopelículas, lo cual es crucial para evitar la propagación de enfermedades, (Jawad et al., 2022). Este estudio sugiere que los materiales a base de bismuto son una herramienta prometedora para el tratamiento antimicrobiano.

El BiOI se ha probado con diversas combinaciones de nanopartículas, como el estudio de Shi y colaboradores (2023) donde estudiaron un nuevo fotocatalizador $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MoS}_2/\text{BiOI}$, activo con luz visible. El material fue probado en la desinfección de *E. coli* donde mostro una reducción efectiva en el número total de bacterias llegando a la inhibición completa en 100 min. También diseñaron un experimento con una membrana semipermeable para controlar la superficie de contacto y observaron que el contacto entre el fotocatalizador y las bacterias es necesario para lograr la inactivación óptima de los microorganismos (Shi et al., 2023)

Recientemente, Jimenez-Relinque y colaboradores (2024) sintetizaron oxihalogenuros de bismuto, incluidos BIOX (X = Cl, Br, I) y algunas heteroestructuras. Los materiales fueron evaluados en procesos de purificación de aire, valorando la descomposición de fenol y la inactivación de *E. coli*. Sus resultados mostraron que las heteroestructuras presentan una eficiencia aumentada en la degradación del fenol. Mientras que para el proceso antimicrobiano el compuesto BiOCl fue el que exhibió un mayor desempeño con 0.25 g/L, la suspensión de interacción se mantuvo 30 min en oscuridad y 60 min

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

con irradiación de luz, indicando que únicamente se encontró efecto inhibitorio después de la irradiación con luz UV (Jimenez-Relinque et al., 2024).

Respecto al diseño de reactores fotocatalíticos, Vargas y colaboradores (2024) diseñaron un reactor tubular de PVC que contiene TiO_2 como material fotocatalítico fijado en las paredes internas, con cintas de lámparas LED-UV colocadas en el interior. La actividad antimicrobiana fue evaluada por atmosferas contaminadas natural y artificialmente. Los resultados mostraron una eficiencia positiva en ambas atmosferas, sin embargo, reportan presencia de UFC dentro de los tubos fotocatalíticos (Vargas et al., 2024)

En nuestro grupo de investigación, Pedroza Herrera utilizó cobre como dopante del TiO_2 para emplearlo como fotocatalizador activo bajo luz visible. En este estudio se observó un aumento considerable en la capacidad de desinfección, lo que destacó la efectividad del dopaje con cobre para mejorar la respuesta del TiO_2 a longitudes de onda más largas (Pedroza Herrera, 2016). De manera similar, este material fue empleado para la desinfección de aire en salas de estomatología, donde se diseñó un prototipo de reactor fotocatalítico (UV-Vis) que logró una desinfección superior al 70% (Martínez-Montelongo et al., 2020). El mismo diseño del prototipo se utilizó para evaluar la capacidad de desinfección del aire utilizando estructuras de ZnO-Cu^{+2} y de Ag@ZnO-Cu^{+2} . En este trabajo se demostró que el compuesto con plata mejoró significativamente la desinfección del aire en un bioterio, logrando una reducción notable en el conteo de hongos muestreados, lo que sugiere que la incorporación de la plata en las estructuras de ZnO-Cu^{+2} puede proporcionar aún más la eficiencia de desinfección en aplicaciones prácticas (Medina-Ramírez et al., 2022).

3. JUSTIFICACIÓN

A partir del inicio de la pandemia COVID-19 se ha incrementado la evidencia de que los virus y otros organismos pueden ser transportados a través de los sistemas de ventilación, facilitando con ello la transmisión de enfermedades infecciosas (Srivastava et al., 2021). Por ello, es evidente la necesidad de desarrollar tecnologías eficientes para la purificación del aire de interiores; la OMS lo considera como un problema social, debido a que los contaminantes de aire interior provocan la muerte de hasta 4.3 millones de personas cada año alrededor del mundo (C. Kim et al., 2021). Mientras que la EPA los clasifica como uno de los cinco peligros principales en el ambiente (Swamy, 2021). Reducir la exposición a los contaminantes del aire interior representa un gran desafío, en la actualidad se realizan múltiples investigaciones con el fin de diseñar aparatos para la purificación rápida y eficiente de aire de interiores, en los cuales se utilizan filtros fotocatalíticos de luz ultravioleta (Bragoszewska et al., 2019). Así mismo, la crisis a nivel mundial provocada por la pandemia por coronavirus requiere tecnologías que permitan purificar el aire a niveles seguros. En este trabajo se propone diseñar un reactor fotocatalítico empacado con nanomateriales de oxi-halogenuros de bismuto y plata que sea altamente eficiente en la desinfección de aire de interiores, ya que existe evidencia que las nanoestructuras de óxidos de bismuto presentan un buen efecto antimicrobiano por fotocatalisis activada con luz LED (Vázquez Olmos et al., 2018). De esta manera, al incorporar la plata los compuestos sintetizados presentarán una actividad sinérgica en la desinfección. Este desarrollo requiere, caracterizar los materiales con diversas técnicas para determinar tamaño, forma, área superficial, etc. Además de determinar la concentración mínima inhibitoria con organismos modelo, ya que son datos indispensables para determinar la eficiencia del reactor. Los estudios previos de esta investigación muestran el desarrollo de un prototipo de filtro de aire probado en laboratorio con entornos de condiciones reales, mostrando una alta eficiencia en la desinfección de aire, por lo cual, continuando con las fases de la maduración tecnológica, antes de la introducción al mercado, el prototipo del reactor requiere una demostración tecnológica que conlleva a pruebas en un ambiente real y relevante.

4. HIPÓTESIS

Un reactor fotocatalítico automatizado y empacado con materiales nanoestructurados de oxi-halogenuros de bismuto y plata, al ser irradiado con luz visible será un dispositivo capaz de desinfectar el aire de espacios cerrados, inhibiendo el desarrollo y distribución de microorganismos capaces de producir enfermedades respiratorias.

5. OBJETIVOS

5.1. General:

Diseñar y construir un prototipo fotocatalítico, a escala laboratorio, que permita llevar a cabo la desinfección de aire de interiores.

5.2. Específicos

- Sintetizar nanomateriales soportados de oxi-halogenuros de bismuto y oxi-halogenuros de bismuto-Plata.
- Caracterizar los nanomateriales soportados mediante SEM-EDS, XRD, área superficial BET, pruebas de fotocorriente.
- Re-diseñar y adecuar un prototipo fotocatalítico para la desinfección de aire de interiores.
- Evaluar la eficiencia de desinfección del sistema fotocatalítico.
- Evaluar y optimizar las variables de operación del prototipo para la desinfección de aire de interiores.

6. METODOLOGÍA

6.1. Síntesis de materiales nanoestructurados

6.1.1. Síntesis de materiales BiOX, BiOX/GO (X = Cl o I)

La síntesis de nanomateriales de oxi-halogenuros de bismuto se realizó de acuerdo a lo reportado por He y colaboradores (He et al., 2016), el método consiste en realizar un procedimiento solvotermal asistido por microondas para la obtención de estructuras de oxi-halogenuros de bismuto. A continuación, se describe, de manera resumida, esta metodología.

1. Se preparó una solución etilenglicol en agua 5:1 (v/v) como solvente.
2. Se disolvieron por separado, 2 mmol de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y 2 mmol de la sal precursora del halógeno (KCl o KI) en 20 mL del solvente preparado en el paso uno.
3. Se tomaron 2.5 mL de cada solución en un vial para microondas, agregando por goteo la solución de KI a la solución de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en agitación constante por una hora.
4. La reacción a microondas (CEM, discover system) se realizó bajo presión con los siguientes parámetros: potencia 300 W, temperatura 120°C, tiempo 20 min.
5. La recuperación del material se realizó por centrifugación (centrífuga UNICO PowerSpintm^{HX} centrifugue C822) a 3400 rpm por 5 min.
6. Se realizaron 5 lavados con etanol anhidro y etanol-agua para posteriormente secar a 60°C, al menos por 24 h.

Para los compósitos de BiOX/GO se agregaron 10 mg de GO en el vial del paso 3 y se prosiguió de acuerdo con el protocolo de la síntesis de BiOX.

6.1.2. Síntesis de óxido de grafeno

La síntesis de grafeno se realizó con el método de Hummer de acuerdo a lo reportado por Lee y colaboradores (Yu-Hsun et al., 2017). El método desarrollado se describe brevemente a continuación:

1. Se mezcló 1 g de grafito en polvo con 0.5 g de nitrato de sodio (NaNO_3) en un medio de 23 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado a 0°C usando baño de hielo.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
2. Se agregaron 3 g de permanganato de potasio (KMnO_4), se mantuvo en agitación y se elevó la temperatura a $35\text{ }^\circ\text{C}$ durante 12 h.
 3. Se añadieron 3 g más de KMnO_4 manteniendo la agitación por 15 min y dejando en reposo por 3 h.
 4. Lentamente, se agregaron 46 mL de agua desionizada, con agitación lenta. Se elevó la temperatura a $95\text{ }^\circ\text{C}$ y se mantuvo en agitación durante 15 min.
 5. Se agregaron 140 mL de H_2O tibia para diluir y H_2O_2 30% por goteo y en agitación.
 6. Se filtró en matraz Kitasato usado bomba de vacío con filtro Whatman 42 y se recuperó el retenido o torta de filtrado.
 7. Se realizaron varios lavados con H_2O destilada y un lavado con 100 mL de HCl 10%.
 8. El material sólido se recuperó por centrifugación y se dejó secar por al menos 12 h a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

6.1.3. Síntesis de materiales $\text{AgX}/\text{BiOX}/\text{GO}$ ($X = \text{Cl}$ o I)

La síntesis de los compósitos con Ag se realizó empleando los materiales de BiOI/GO dentro de la ruta de síntesis de los AgX ($X = \text{Cl}$ o I) para obtener un dopaje de al 1% en peso. El método desarrollado se describe a continuación:

1. Se dispersaron 0.5 g de BiOX/GO en 30 mL de goma arábica (GA) al 3% con agitación por 30 min y sonicación por 10 min.
2. Se preparó una solución de AgNO_3 (3.6 mg) en 1 mL de H_2O desionizada.
3. Se preparó una solución de sal de potasio (KI o KCl) en 1 mL de H_2O desionizada.
4. Se agregó por goteo la solución de AgNO_3 al matraz de GA y permaneció en agitación por 5 min.
5. Se añadió por goteo la solución de la sal de potasio al matraz de GA y continuó en agitación por 30 min.
6. Se separó por centrifugación y se dejó secar por 24 h a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

6.2. Soporte de materiales

El proceso de soporte de materiales se realizó por medio de un proceso de inmersión sobre la superficie de zeolita la cual es un material altamente poroso útil para el proceso de fabricación del reactor para desinfectar aire.

1. Para soportar el material se realizó el pesaje de 10 g de perlita, la cual fue previamente tamizada para seleccionar las perlitas de mayor tamaño.
2. Se lavaron con HCl al 1%, dejando en ebullición por 20 min, se dejaron enfriar, para después lavar con agua (aproximadamente 3 lavados).
3. Se colocaron, nuevamente, por 20 min en ebullición en agua destilada para retirar cualquier exceso de HCl. Se dejaron enfriar y secar a 120°C en estufa de secado HINOTEK (DHG 9035A).
4. Se preparó una suspensión de 0.5 g de materiales de BiOI o BiOI/GO en 50 mL de GA 3%.
5. Se impregnaron las perlitas lavadas con 5 mL de la suspensión de BiOI o BiOI/GO, por el método de inmersión, luego se secaron 80°C por una hora.
6. El paso 5 se repitió por 4 veces.
7. Finalmente se calcinó a 300°C por 1 hora.
1. Las perlitas, una vez impregnadas, fueron almacenadas en frascos ámbar a temperatura ambiente hasta su uso.

6.3. Caracterización

Los materiales se caracterizaron por microscopia electrónica de barrido–espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS), microscopia electrónica de transmisión (HRTEM), microscopia de fuerza atómica (AFM), espectroscopia infrarroja (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia UV-Vis con reflectancia difusa (UV-DRS), área de superficie específica (S_{BET}) y análisis electroquímico.

6.3.1. Microscopia electronica de barrido (SEM-EDS)

El análisis de la morfología superficial y el tamaño se analizó con un SEM equipado con una sonda de microanálisis de dispersión de energía de rayos X (EDS) operada (JSM-7800F JEOL) en el CIO campus León, Gto. Todas las

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

muestras fueron inmovilizadas en placas de silicio por adhesión superficial y observadas a diferentes magnificaciones.

6.3.2. Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)

La morfología de los materiales se confirmó mediante HRTEM (ARM-200F JEOL) que opera a 200kV. De esta manera, se estudiaron y confirmaron los patrones de difracción XRD, así como la determinación de la composición química por EDS.

6.3.3. Microscopía de fuerza atómica (AFM)

La caracterización de las muestras depositadas se realizó mediante AFM. Las muestras se prepararon por depósito en portaobjetos, dispersando 0.5 mg del nanomaterial en 1 mL de GA al 5%. Se depositó una gota (20 μ L) utilizando la técnica Dr. Blade sobre un portaobjetos limpio. Las imágenes fueron analizadas con un AFM (Bruker dimension Edge) utilizando el modo *Scan Asyst*.

6.3.4. Espectrofotometría Infrarroja (FT-IR)

Las interacciones químicas de las NPs se confirmaron mediante el análisis de los espectros obtenidos por FT-IR, utilizando un espectrofotómetro JASCO FT/IR-4100. Se realizó el escaneo por 40 s realizando 35 escaneos por análisis.

6.3.5. Difracción de rayos X (DRX)

Las fases cristalinas de BiOX y BiOX/GO (X= I ó Cl) se obtuvieron mediante el análisis DRX con un difractómetro D2 Phaser de Bruker en el CIO campus León, Gto., con las siguientes características: Cu-K α , 30kV, 10 MA, λ =1.54184 nm en un intervalo de 10° a 80° en 2 θ y con un paso de 0.02°/s.

6.3.6. Espectroscopía de reflectancia difusa de UV-Vis (DRS)

El análisis detallado de las propiedades ópticas de los materiales se realizó mediante espectrofotometría en el rango UV-visible, una técnica que permite obtener información sobre la interacción de la luz con los materiales. Para evaluar las propiedades de reflectancia, se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo scientific evolution 220 UV-Visible) en las instalaciones del CIO, campus Aguascalientes, Ags.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los valores del band gap (E_g) fueron obtenidos mediante la representación en TAUC – Plot $\alpha(h\nu) = A[h\nu - E_g]^{1/2}$. Donde: α = coeficiente de absorción, h = constante de Planck, ν = frecuencia de la radiación, E_g = Band gap.

6.3.7. Análisis del área superficial S_{BET}

La determinación de la superficie específica de los materiales de BiOX ($x= I$ ó Cl), se llevó a cabo utilizando el método BET (Brunauer-Emmett-Teller) utilizando un equipo de desorción (autosorb iQ automated gas sorption analyzer de Quantachrome) en el cual se realizó la fisisorción con nitrógeno (N_2) a 77 K. Todas las muestras fueron desgasificadas a una temperatura de 90 °C por 24 h. Para realizar el análisis se utilizó aproximadamente 1 g del material.

6.3.8. Análisis electroquímico

El electrodo de trabajo se preparó utilizando 400 μ L de etanol y 40 μ L de nafion donde se dispersaron 10 mg de materiales de BiOX o BiOX/GO ($X = I, Cl$) con sonicación por 1 h, para posteriormente depositar una película delgada sobre la superficie de vidrio FTO (previamente lavada con etanol y acetona) secada a temperatura ambiente.

La voltamperometría cíclica es útil para estudiar procesos REDOX, se basa en aplicar un barrido de potencial al electrodo de trabajo, para caracterizar el sistema electroquímico. El análisis se realizó utilizando un arreglo convencional de 3 electrodos, como electrodo de referencia Ag/AgCl, un electrodo de malla de platino como contra electrodo y el electrodo de trabajo FTO.

Como electrolito se utilizó Na_2SO_4 a una concentración de 0.1 M. Las mediciones se realizaron en un potenciostato SP-300 Biologic®. La velocidad de barrido fue de 100 mV/s, la ventana de potencial utilizada fue de -1.0 V a 1.0 V.

6.4. Evaluación de eficiencia de desinfección

Las pruebas de actividad antibacteriana se realizaron de acuerdo a un estudio previo de nuestro grupo de trabajo (Martínez-Montelongo et al., 2021) que consiste en utilizar microorganismos modelos de interés hospitalario para someterlos a interacción con los nanomateriales por un tiempo determinado con

el fin de encontrar la concentración mínima bactericida y concentración mínima inhibitoria.

1. Se realizaron inóculos de *Staphylococcus aureus* de 18 a 24 h de crecimiento en 3 mL de Infusión Cerebro Corazón (ICC).
2. Cada inóculo se centrifugó (UNICO PowerSpintmHX centrifugue C822) a 3400 rpm por 5 min, se desechó el sobrenadante y se realizaron 2 lavados con buffer de fosfatos (PBS; pH=7), seguidos de centrifugación.
3. El pellet de bacterias se suspendió en 3 mL de PBS y se realizó ajuste de densidad óptica de los inóculos con espectrofotómetro (Helios Omega) utilizando el patrón de turbidez BBL UV-Vis, McFarland 0.5, en el cual se calibró la densidad óptica de 0.08 a 0.1 con una longitud de onda de 625 nm, dicha densidad óptica corresponde aproximadamente a 1.5×10^8 UFC/m³.
4. Se realizaron diluciones para obtener inóculos de $\sim 1.5 \times 10^4$ UFC/mL (MO) con las cuales se realizaron los experimentos de interacción con diversas concentraciones de los materiales nanoestructurados.
5. Por separado, se prepararon las concentraciones stock de los nanomateriales (sNM's) en soluciones con GA 1.5% para dar estabilidad.
6. Se prepararon tubos de acuerdo con la tabla 2 de las suspensiones de bacteria y nanomateriales.

Tabla 3. Preparación de medios para la interacción con NMs

Tubo	PBS (μL)	MO (μL)	GA (μL)	NM's (μL)
1	1800	200	0	0
2	1700	200	100	0
3	1700	200	0	100
4	1700	200	0	100
5	1700	200	0	100
6	1700	200	0	100

* PBS: buffer de fosfatos con pH = 7. MO: microorganismo en dilución $\sim 1.5 \times 10^4$ UFC/mL, GA: GA a 1.5%. NM's: stock preparado de cada concentración de nanomateriales diferente en cada tubo.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
7. Los tubos de interacción se incubaron en baño maría con agitación y calentamiento (LAB COMPANION (BS-06), Korea), a 37°C, 65 rpm por 5 h u 8 h, con irradiación de luz visible.
 8. Terminado el tiempo los tubos se retiraron del baño maría, se sembraron por goteo y por dispersión en agar selectivo sal y manitol (DB Boxon) o Mueller Hinton (DB Boxon) y se incubaron a 37°C por 24 h.

6.5. Evaluación de la toxicidad

Las pruebas de toxicología clásica se llevaron a cabo utilizando las células A549 (epitelio alveolar) como organismo modelo de células alveolares. Para realizar la exposición a los NM's se describe brevemente el procedimiento.

1. Se cultivaron células A549 en una placa de cultivo celular de 96 pozos con una confluencia de 50,000 células/cm² en 200 µL de medio HAM-F12 10% suero fetal bobino (SFB).
2. Se dejaron en incubación para adherirse al menos por 24 h.
3. Se preparó un stock de NM's en GA al 3% con una concentración de 1 mg/mL, se llevaron a sonicar por 15 min antes de la exposición.
4. Pasadas las 24 h de incubación, se retiró el medio de cultivo de cada pozo donde se sembraron células.
5. Para cada pozo, se tomaron cantidades del stock para obtener concentraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 µg/mL y se adicionaron a medio HAM-F12 al 1% SFB.
6. Se dejaron en exposición por 24 h en incubación a 37 °C con 5% de CO₂.
7. Pasado el tiempo de exposición se tomaron 50 µL de cada pozo y se pasaron a otra placa de cultivo celular de 96 pozos para realizar el ensayo **LDH**.
8. Se retiró el resto del medio a cada pozo y se prosigió a realizar la prueba de viabilidad celular con medio DMEM-HAM sin rojo fenol y **CCK-8**.
9. La lectura espectrofotométrica se realizó a 450 nm en un lector de placas.

6.6. Pruebas de desinfección de aire

Para probar la eficiencia de desinfección en aire, se utilizó un prototipo de filtro que consiste un cilindro de vidrio transparente (Chromaflex) de 15 cm de altura

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y 2.5 cm de diámetro interno, en su interior se colocó el NM soportado en perlita asegurando los extremos con algodón.

El muestreo del aire se realizó en clínicas hospitalarias dentales de la Unidad Médico Didáctica (UMD) de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Se utilizó el método de impactación de aerosoles empleando el impactador de cascada Andersen para partículas viables de 6 niveles (Thermo Scientific™), el muestreador multi-orificio es usado comúnmente para determinar el número de partículas viables de bioaerosoles o aerosoles microbianos, el caudal de succión emplea una bomba de vacío de 28.3 L/min.

1. Se preparó el prototipo de vidrio empacándolo con material soportado en las peritas al 80 % de su capacidad, asegurando los extremos con algodón para impedir su movimiento y daño mecánico.
2. El muestreo se dividió en 3 fases, en la primera sin la introducción del filtro para determinar la cantidad de UFC/m³ en el ambiente hospitalario. La segunda y tercera etapa fue conectado el filtro de BiOI y BiOI/GO.
3. Se colocaron cajas Petri con agar nutritivo no selectivo Mueller Hinton en todos los niveles del impactador.
4. La bomba permaneció en operación por 15 min.
5. Al terminar el tiempo las cajas Petri fueron retiradas y almacenadas para su incubación.
6. Entre cada muestreo el impactador fue sanitizado con etanol 70° G.L. y se procedió a los siguientes muestreos.

Todos los muestreos se realizaron al centro de la clínica en día de actividades normales, se encontraban aproximadamente 30 personas en el lugar entre pacientes y profesionales de la salud.

6.7. Diseño y construcción del filtro de aire

Para el diseño del prototipo se consideraron los siguientes aspectos: el espacio interior a desinfectar, el flujo de aire, el tamaño y la activación fotocatalítica por luces LED.

El diseño del filtro fotocatalítico tiene la característica de ser un reactor tubular de vidrio empacado con los NM's soportados en perlita, en consecuencia, el fotocatalizador puede ser activado con luces LED visibles y UV. Los diseños del

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

filtro para transferencia tecnológica fueron elaborados en base al prototipo de vidrio utilizado, planteando dos posibles aplicaciones, transporte público y hospitales.

El prototipo de filtro para transporte público consistió en un sistema compuesto por dos tubos de vidrio. En el primero de ellos se empacó el material fotocatalítico, y el segundo tubo empacado con una membrana porosa de 4 a 10 μm . El sistema de iluminación para activar el fotocatalizador incluyó dos luces LED UV que proporcionan una longitud de onda de 395-400 nm, junto con dos tiras de 5 LED visibles de luz azul (450-500 nm). Además, se incorporó una bomba de vacío de aire con un flujo de 8 L/min y un nivel de ruido inferior a 60 dB, así como una tarjeta Arduino para su operación, diseñada para funcionar durante una jornada laboral de 12 h.

La versión destinada a espacios del sector salud (hospitales) consistió en un tubo de vidrio empacado con material fotocatalítico, acompañado de un sistema de iluminación similar para activar el fotocatalizador, con dos luces LED UV y dos tiras de 5 LED visibles. Además, se sustituyó la bomba por un ventilador centrífugo que proporciona una presión de aire de 62.4 mmH₂O, con un nivel de ruido inferior a 60 dB, junto con una tarjeta Arduino para su operación.

6.8. Evaluación del filtro de aire

Para evaluar los diseños de filtros de aire, cada prototipo se utilizó por separado en áreas de la Unidad Médico Didáctica (UMD) de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Se empleó el método de impactación de aerosoles utilizando el impactador de cascada Andersen para partículas viables de 6 niveles (Thermo Scientific™).

El muestreo se realizó durante una jornada laboral completa. La primera muestra se tomó sin el filtro para determinar la cantidad de UFC/m³ en el ambiente hospitalario al inicio de la jornada, una muestra con filtro inmediatamente después para comenzar el proceso de desinfección. Las muestras siguientes se tomaron cada 3 h con los filtros en funcionamiento.

Entre cada muestreo, el impactador fue sanitizado con etanol al 70° G.L. antes de proceder con los siguientes muestreos. Durante las 3 h intermedias, el filtro fue irradiado para continuar con el proceso de desinfección.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Todos los muestreos se realizaron en el centro de la clínica durante un día de actividades normales, con la presencia de entre 20 y 30 personas, incluyendo pacientes y profesionales de la salud. Se consideraron variables no controladas, como el flujo de personas y las ventanas y puertas de acceso abiertas.



7. RESULTADOS

7.1. Síntesis de materiales.

Usando la metodología descrita anteriormente para la síntesis de cada material, se lograron obtener polvos característicos con altos rendimientos (Tabla 4). El polvo de BiOI obtenido presentó una coloración naranja (Figura 10–A), mientras que el BiOCl se caracterizó por ser un polvo blanco (Figura 10–B). El GO sintetizado a partir de grafito exhibió un color negro (Figura 10–G). Todos los materiales se obtuvieron en forma de polvos finos aparentemente sin generar aglomeraciones.

Para los compósitos de los materiales con GO se obtuvieron polvos con características similares a los polvos prístinos, pero con una coloración más oscura. El BiOI/GO presentó una coloración marrón (Figura 10–C), mientras que el BiOCl/GO presentó un color gris (Figura 10–D). Por su parte, los compósitos con AgX (X = I ó Cl) presentaron una tonalidad aún más clara y brillante. El AgI/BiOI/GO presentó una coloración café brillante (Figura 10–E) y el AgCl/BiOCl/GO adquirió un color gris brillante (Figura 10–F).

Tabla 4. Características de los materiales sintetizados y porcentaje de rendimiento.

Material	Color	Rendimiento
BiOI	Naranja	94.5 %
BiOCl	Blanco	93.8 %
GO	Negro	65.2 %
BiOI/GO	Marrón	89.1 %
BiOCl/GO	Gris	90.4 %
AgI/BiOI/GO	Marrón brillante	84.0 %
AgCl/BiOCl/GO	Gris brillante	88.0 %

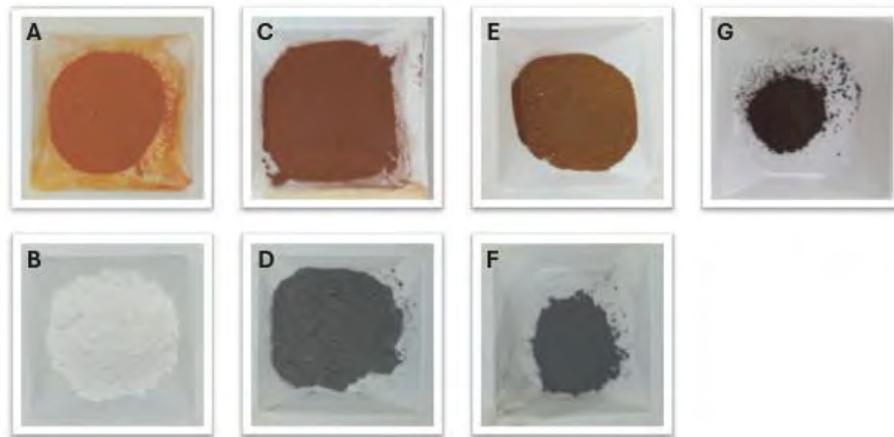


Figura 10. Imágenes de los materiales sintetizados de oxi-halogenuros de bismuto, así como sus compósitos con GO y con AgX. A) BiOI, B) BiOCl, C) BiOI/GO, D) BiOCl/GO, E) AgI/BiOI/GO, F) AgCl/BiOCl/GO, G) GO

7.2. Soporte de materiales

Los materiales con mejor respuesta bactericida se soportaron en perlita por el método de inmersión. Los materiales soportados se emplearon posteriormente para evaluar la eficiencia de desinfección de aire. Se incorporaron 500 mg de BiOX o BiOX/GO (X: ó Cl) por cada 10 g de perlita. La primera evidencia de la incorporación se confirmó con el cambio de coloración y el aumento de peso. La perlita naturalmente tiene un color blanco (Figura 11–A). Las perlitas con coloración naranja corresponden a las impregnadas con BiOI (Figura 11–B), mientras que las de color marrón fueron las impregnadas con BiOI/GO (Figura 11–C). Por otro lado, las impregnadas con BiOCl presentaron una coloración gris (Figura 11–D) y las impregnadas con el compósito de BiOCl/GO presentaron una coloración más oscura (Figura 11–E).



Figura 11. Perlitas impregnadas de material sintetizado. A) Perlita, B) BiOI@perlita, C) BiOI/GO@perlita, D) BiOCl@perlita y E) BiOCl/GO@perlita.

7.3. Caracterización

7.3.1. Microscopia electronica de barrido (SEM-EDS)

El análisis SEM se realizó con la finalidad de determinar la morfología y tamaño de los materiales. Los resultados se muestran en la Figura 12. En las

micrográficas de BiOI se observaron aglomerados característicos de microfiores (Figura 12–A), formadas con láminas finas con un grosor en el orden de los nanómetros (Figura 12–C). Las micrográficas de BiOCl revelaron una forma más ordenada y definida, también conocida como microflor (Figura 12–B), formada igualmente por nano-láminas más uniformes y ordenadas, también llamadas nano-pétalos (Figura 13–D).

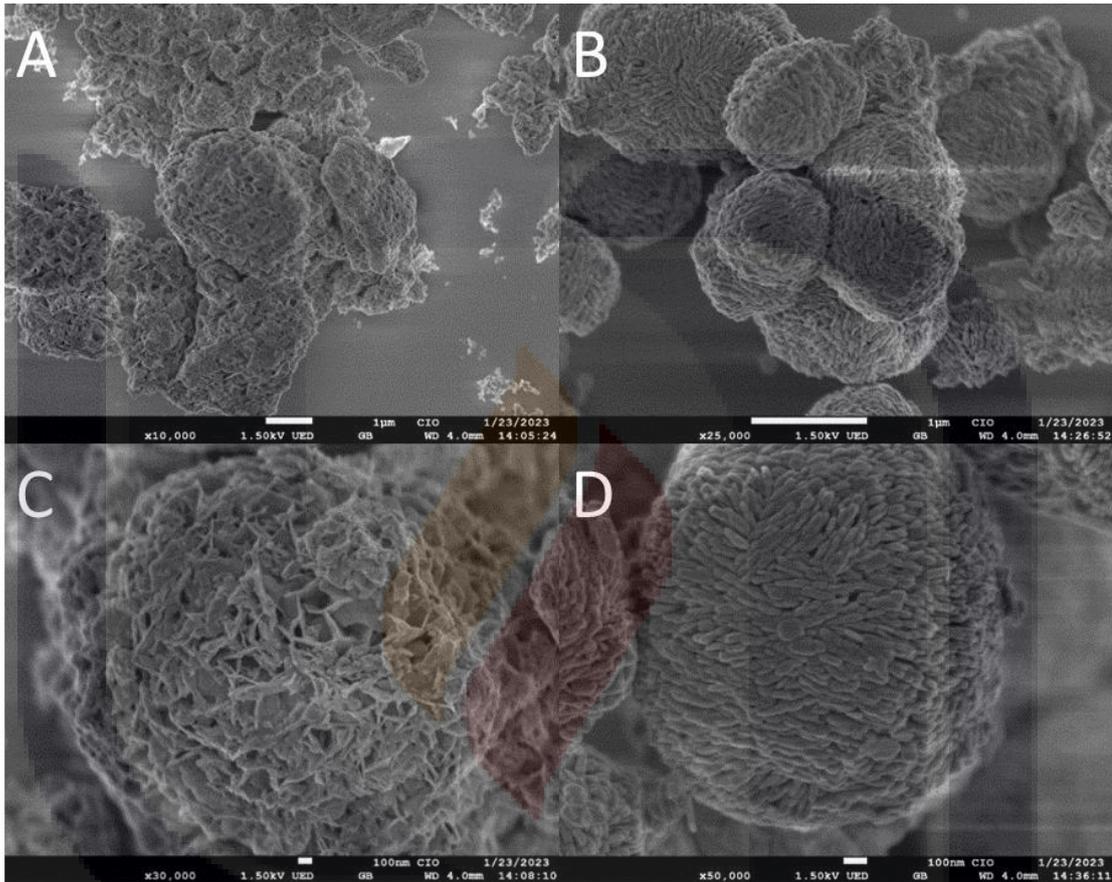


Figura 12. Micrográficas SEM: A) BiOI a x10,000. B) BiOCl a x25,000. C) BiOI a x30,000. D) BiOCl a x50,000.

Las micrográficas SEM para los compósitos se muestran en la Figura 13. En estas se observó el GO en forma de láminas grandes y delgadas, bien distribuidas (Figura 13–A, B). En el caso del compósito de BiOI/GO se puede observar que los nano-pétalos de BiOI se encuentran distribuidos uniformemente sobre la superficie de las láminas de GO (Figura 13–C); sin embargo, no se distinguen las estructuras típicas de microflor que se observó en la naturaleza prístina del material (Figura 13–D). El BiOCl presentó microfiores agrupadas de manera más compactas (Figura 13–E) claramente sobre las láminas de GO. Además, se

observó que las estructuras de BiOCl pierden su forma típica de microflor, volviéndose más compactas (Figura 13–F).

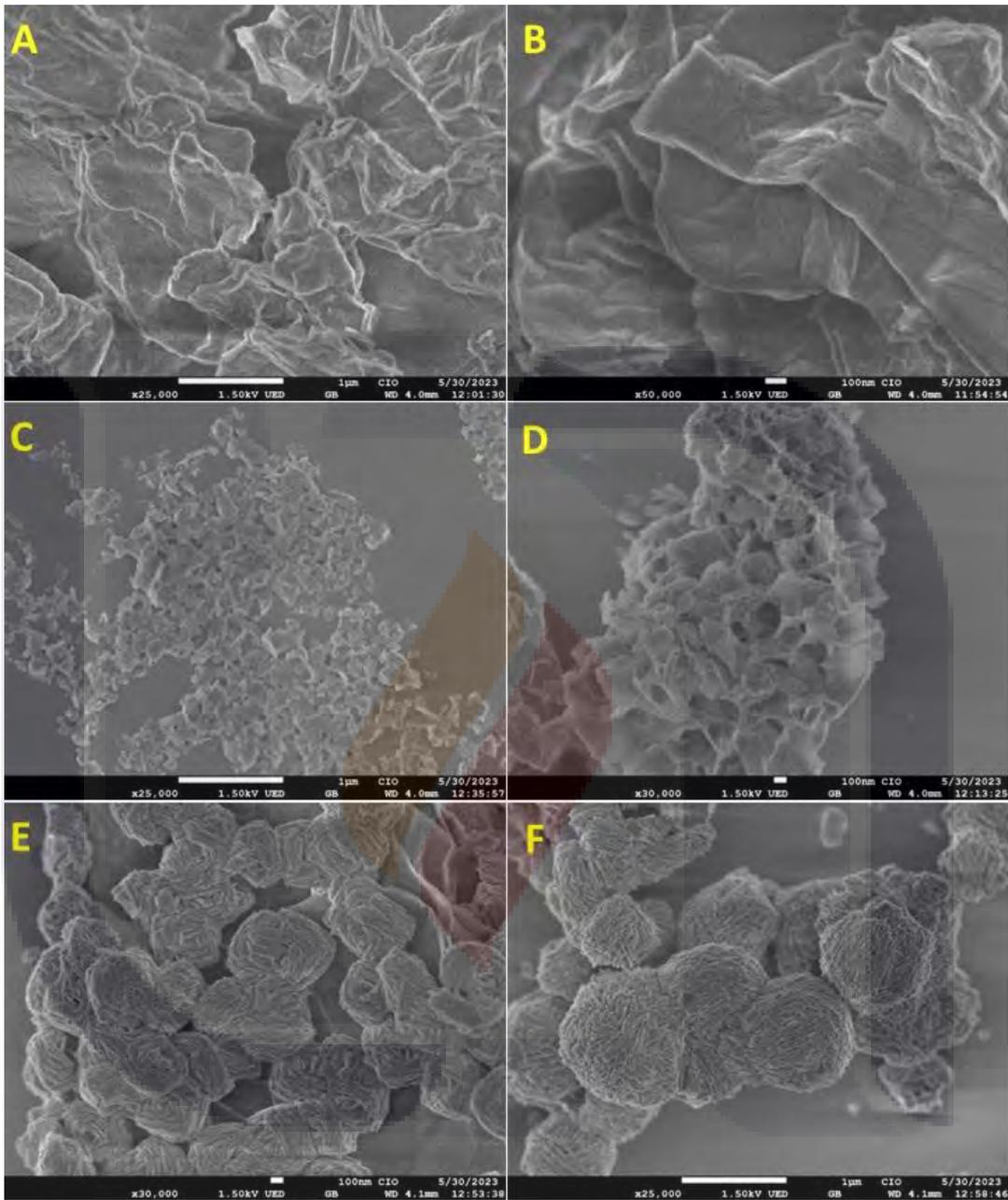


Figura 13. Micrografías SEM A)GO a x25,000. B)GO a x50,000. C)BiOI/GO a x25,000. D)BiOI/GO a x30,000, E) BiOCl/GO a x30,000 F) BiOCl/GO a x25,000.

Los tamaños promedios de todos los materiales analizados por SEM se presentan en la Tabla 5, donde se observa que no se ve afectado el tamaño de los nanopétalos por la presencia de GO.

Tabla 5. Tamaños promedio de los materiales

Material	Tamaño pétalo (nm)	Tamaño microflor (μm)
BiOI	13 ± 3	1.8 ± 0.7
BiOCl	27 ± 7	1.2 ± 0.2
BiOI/GO	12 ± 4	1.4 ± 0.7
BiOCl/GO	30 ± 8	0.8 ± 0.2

La Figura 14 muestra el espectro EDS para los materiales prístinos de BiOI (Figura 16-A), BiOCl (Figura 16-B). Se encuentran imágenes del mapeo que incluyen la micrografía del área donde se realizó la recolección de datos de EDS. El análisis químico elemental de las muestras indica la presencia de los elementos deseados en cada caso además de incluir los respectivos porcentajes atómicos.

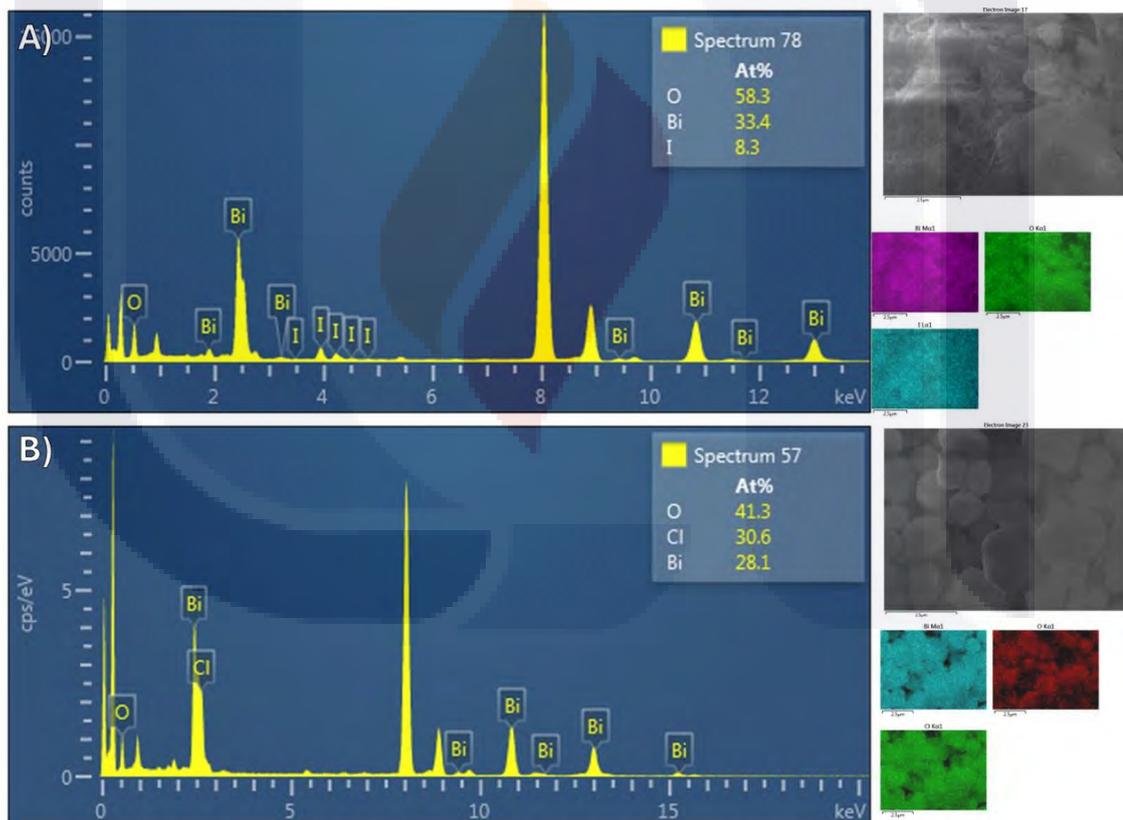


Figura 14. Espectro EDS de las muestras de los materiales prístinos A) BiOI. B) BiOCl. C) GO.

La Figura 15 muestra los análisis para los compósitos con el GO. El BiOI/GO (Figura 15-A), BiOCl/GO (Figura 15-B) y GO (Figura 15-C) confirman la presencia de los elementos y la incorporación del grafeno por la presencia de

carbono. También se incluye el análisis de GO obtenido con su respectivo porcentaje en peso.

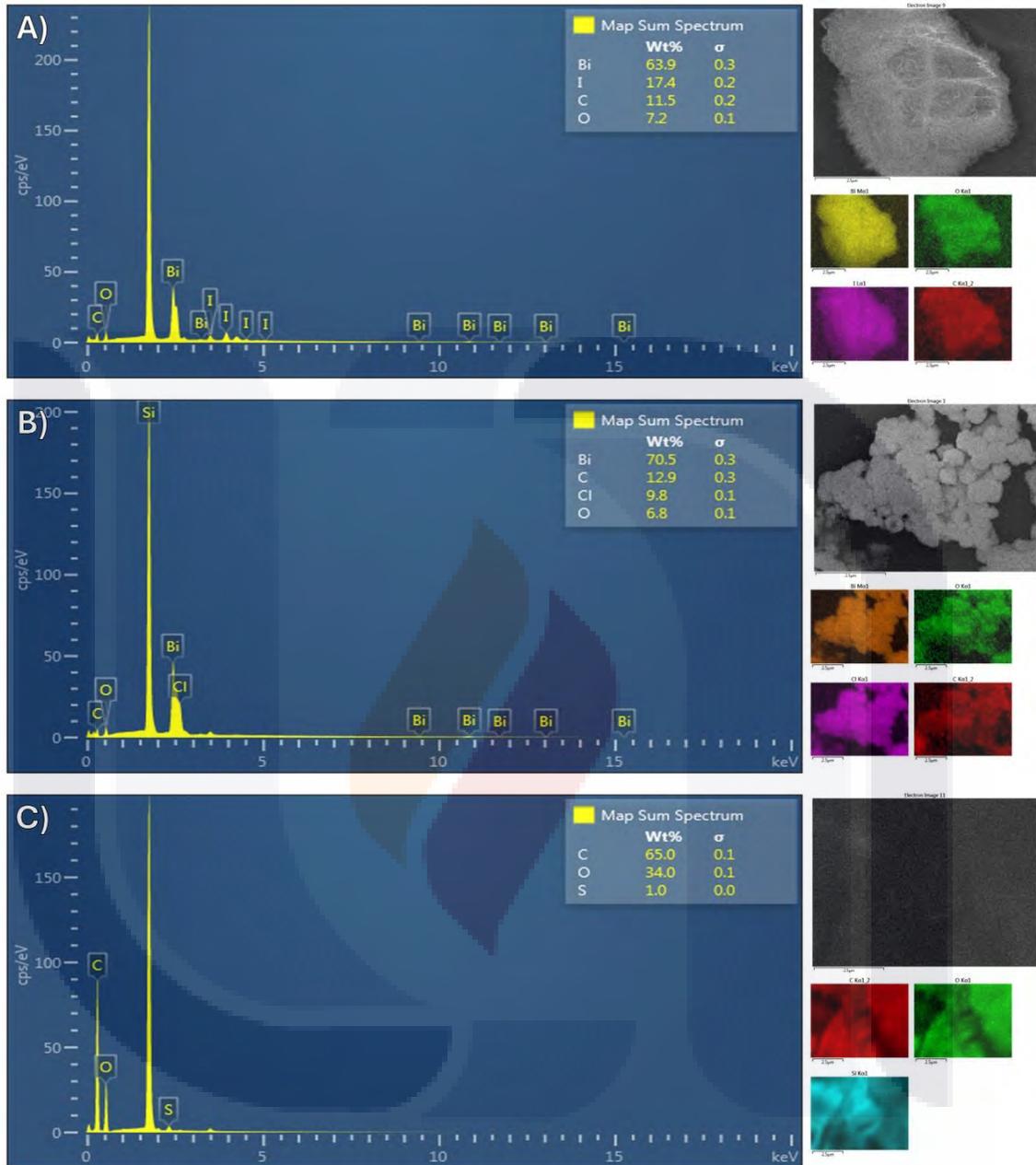


Figura 15. Espectro EDS de las muestras de los materiales A) BiOI/GO B) BiOCl/GO C) GO.

Finalmente, la Figura 16 muestra los análisis EDS realizados a las estructuras que contenían Ag, Los mapeos para el compuesto de Ag/BiOI/GO se presentan en la Figura 16-A, mientras que para los compósitos de AgCl/BiOCl/GO se presentan en la Figura 16-B.

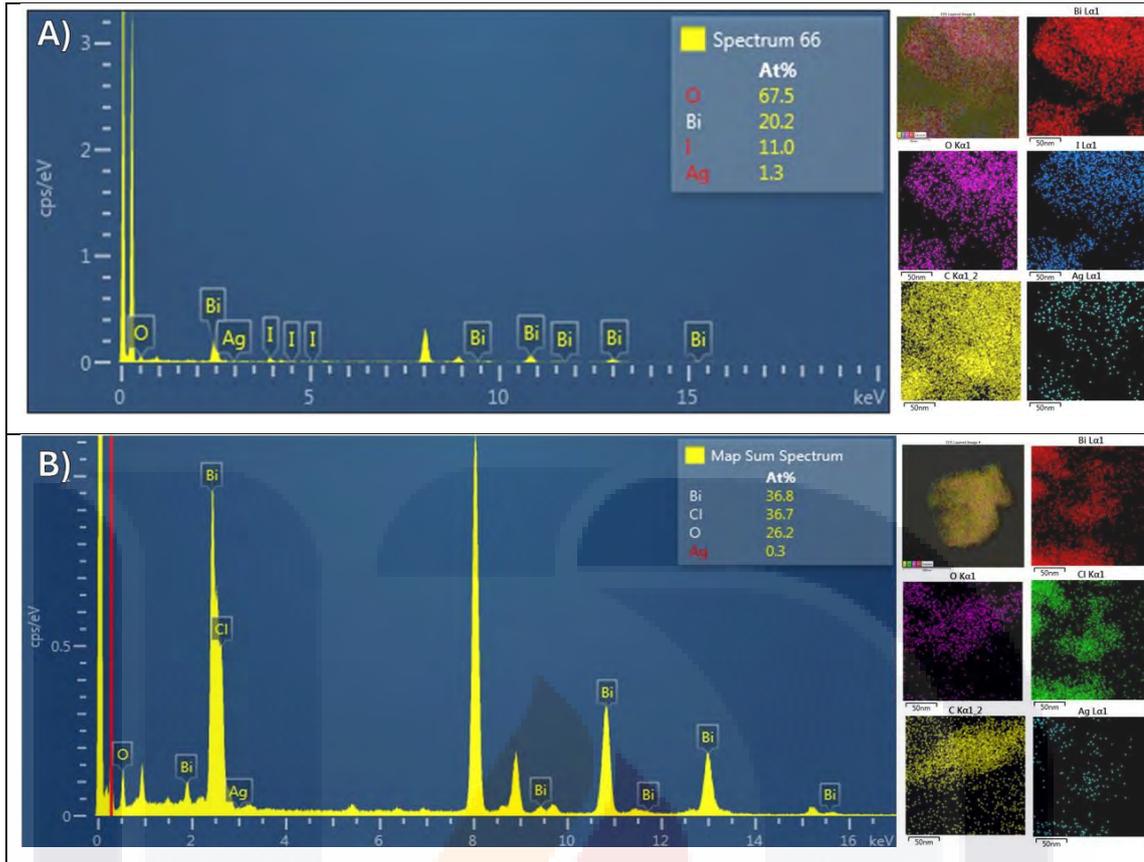


Figura 16. Espectro EDS de las muestras de los materiales con Ag A) AgI/BiOI/GO. B)AgCl/BiOCl/GO.

Se realizó el análisis de los porcentajes atómicos de cada elemento que compone los materiales, algunos de ellos están anexos en los mapeos, se realizó el cambio de porcentaje en peso a porcentaje atómico para observar la composición elemental el cada caso (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis EDX de los materiales.

Elemento	BiOI	BiOCl	GO	BiOI/GO	BiOCl/GO	AgI/BiOI/GO	AgCl/BiOCl/GO
Bismuto	33.4	28.1		16.5	16.0	20.2	36.8
Oxígeno	58.3	41.3	28.0	24.3	20.1	67.5	26.2
Iodo	8.3			7.4		11.0	
Cloro		30.6			13.1		36.7
Carbono			71.8	51.7	50.8		
Plata						1.30	0.3

7.3.2. Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)

La Figura 17 muestra las imágenes de HRTEM para el BiOI, revelando la estructura tridimensional de la microflor compuesta por nanopétalos (Figura 17– A, B y C). En las figuras 17-D, E y F se distinguen las distancias interplanares de los nanopétalos. Las figuras 17–G y H muestran magnificaciones de la microflor, lo cual concuerda con lo observado en SEM. Por último, la Figura 17–I muestra el patrón de difracción de área seleccionada (SAED); al medir el espaciado d , la distancia corresponde a los planos cristalográficos (1 1 0), (1 0 2) y (2 1 2).

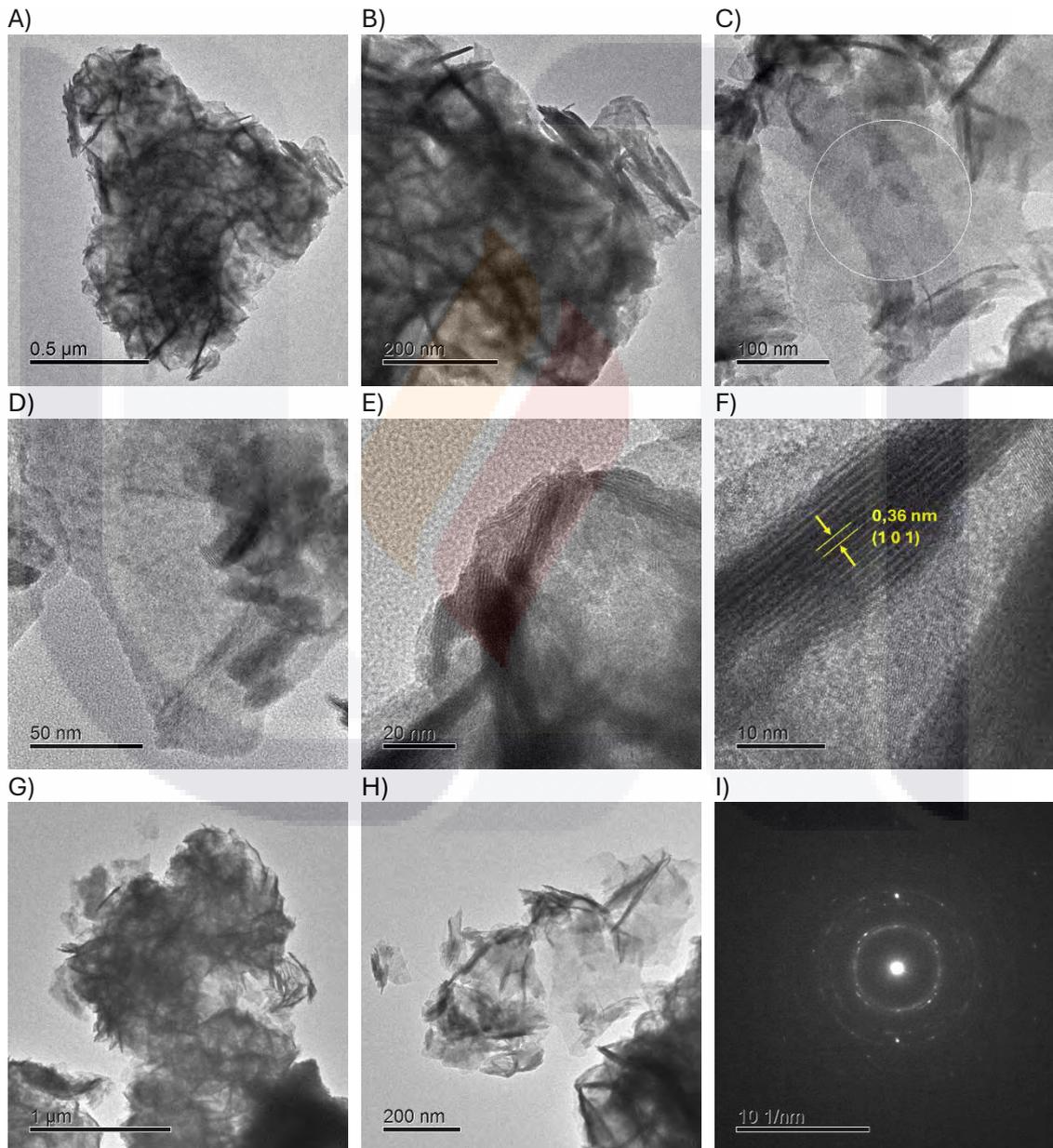


Figura 17. HRTEM de BiOI a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOI, B, C) Imagen TEM de los nanopétalos, E, F) distancias reticulares de BiOI, G, H) acercamientos de microflores de BiOI compuestas por nanopétalos I) Patrón SAED

En la Figura 18 se muestran las micrografías del BiOI/GO, donde se observa la estructura tridimensional del material, que en general pierde su forma de microflor (Figura 18–A, B, C). Las figuras 18–D, E y F muestran aumentos donde se pueden distinguir las distancias reticulares de la estructura 0,38 nm que coincide con el plano (1 0 1). La Figura 18–I muestra el patrón SAED que coincide con los planos del material prístino (1 1 0), (1 0 2) y (2 1 2).

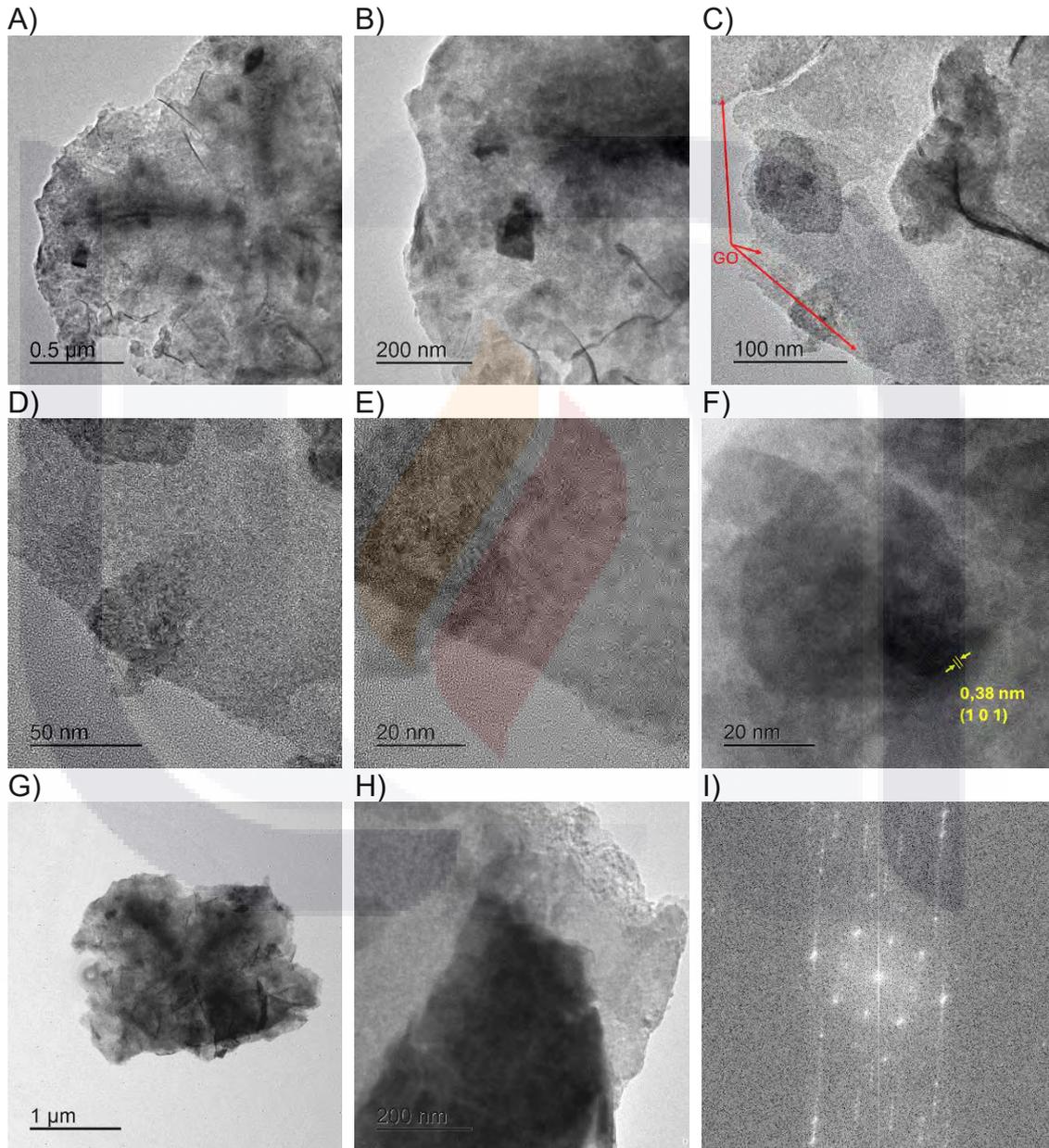


Figura 18. HRTEM de BiOI/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOI/GO, B, C) imágenes 2D de BiOI incorporado a la superficie de GO, E, F) distancias reticulares de BiOI, G, H) acercamientos de microflores de BiOI/GO compuesto I) patrón SAED.

La Figura 19 representan las micrografías para BiOCl, en las figuras 19-A, B y C se presentan los TEM con las estructuras jerárquicas 3D de BiOCl. Las Figuras

19–D, E y F muestran las imágenes HRTEM donde se observan las distancias interplanares que coinciden con 0.74 y 0.37 nm. Algunos acercamientos se pueden observar en las figuras 19–G y H presentando estructuras jerárquicas del material. Por último, la Figura 19–I presenta el patrón SAED que, al medir el espaciado d , la distancia interplanar corresponde a los planos (0 0 1), (0 0 2), (1 0 1) y (1 1 0).

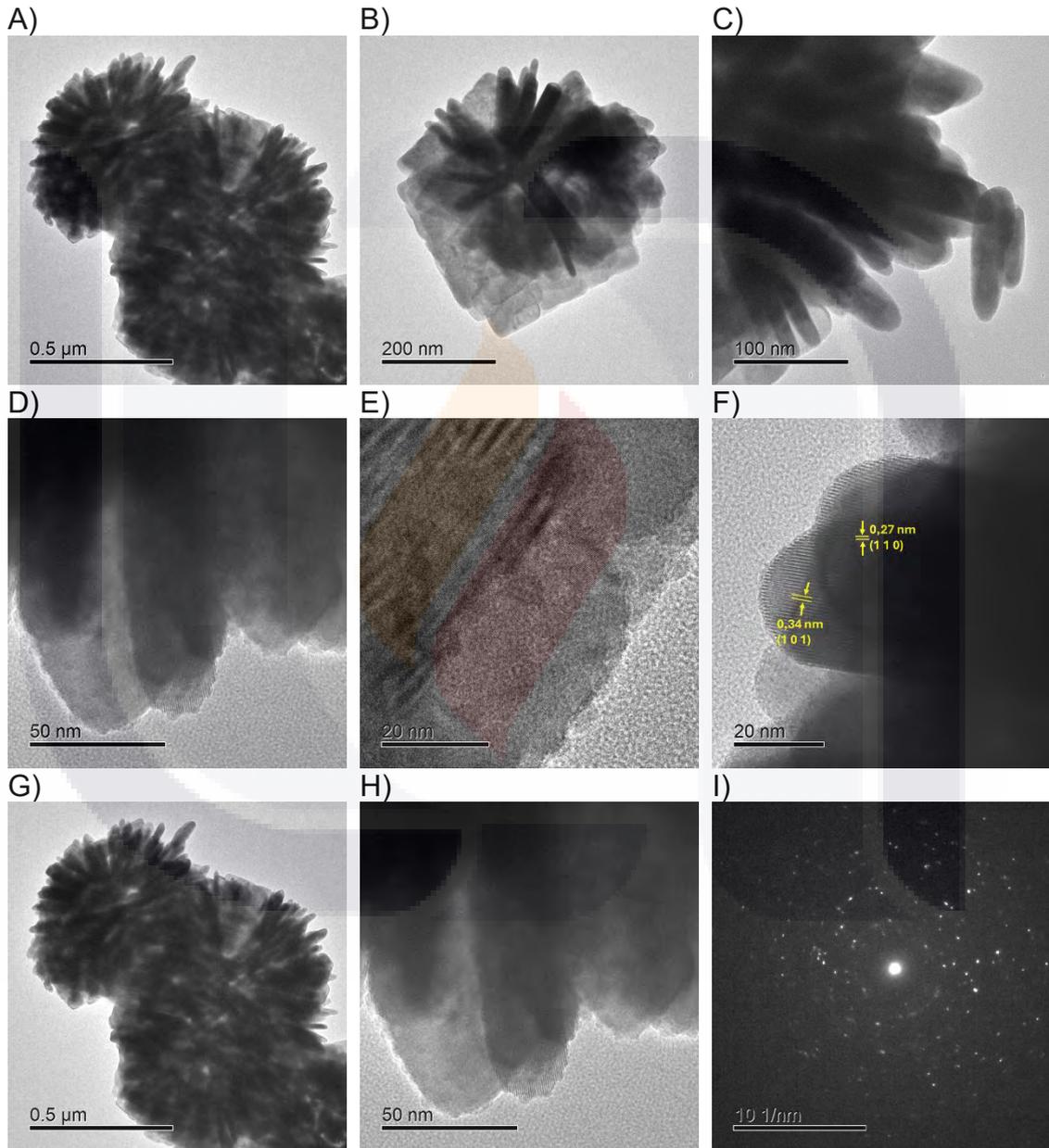


Figura 19. HRTEM de BiOCl a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del BiOCl, B, C) imágenes BiOCl en microflor y otras estructuras jerárquicas, E, F) distancias reticulares de BiOCl, G, H) acercamientos de microflores de BiOCl compuestas, I) Patrón SAED

La Figura 20 muestra en análisis TEM y HRTEM para BiOCl/GO. Las micrográficas muestran la superficie lisa de GO con varias NPs de esparcidas

sobre el GO (Figuras 20 – A a C). Las Figuras 20 – D, E y F muestran las imágenes HRTEM donde se observan las distancias interplanares que coinciden con 0.25 y 0.35 nm. Algunos acercamientos se pueden observar en las figuras 20 – G y H. Por último, la Figura 20 – I presenta el patrón SAED.

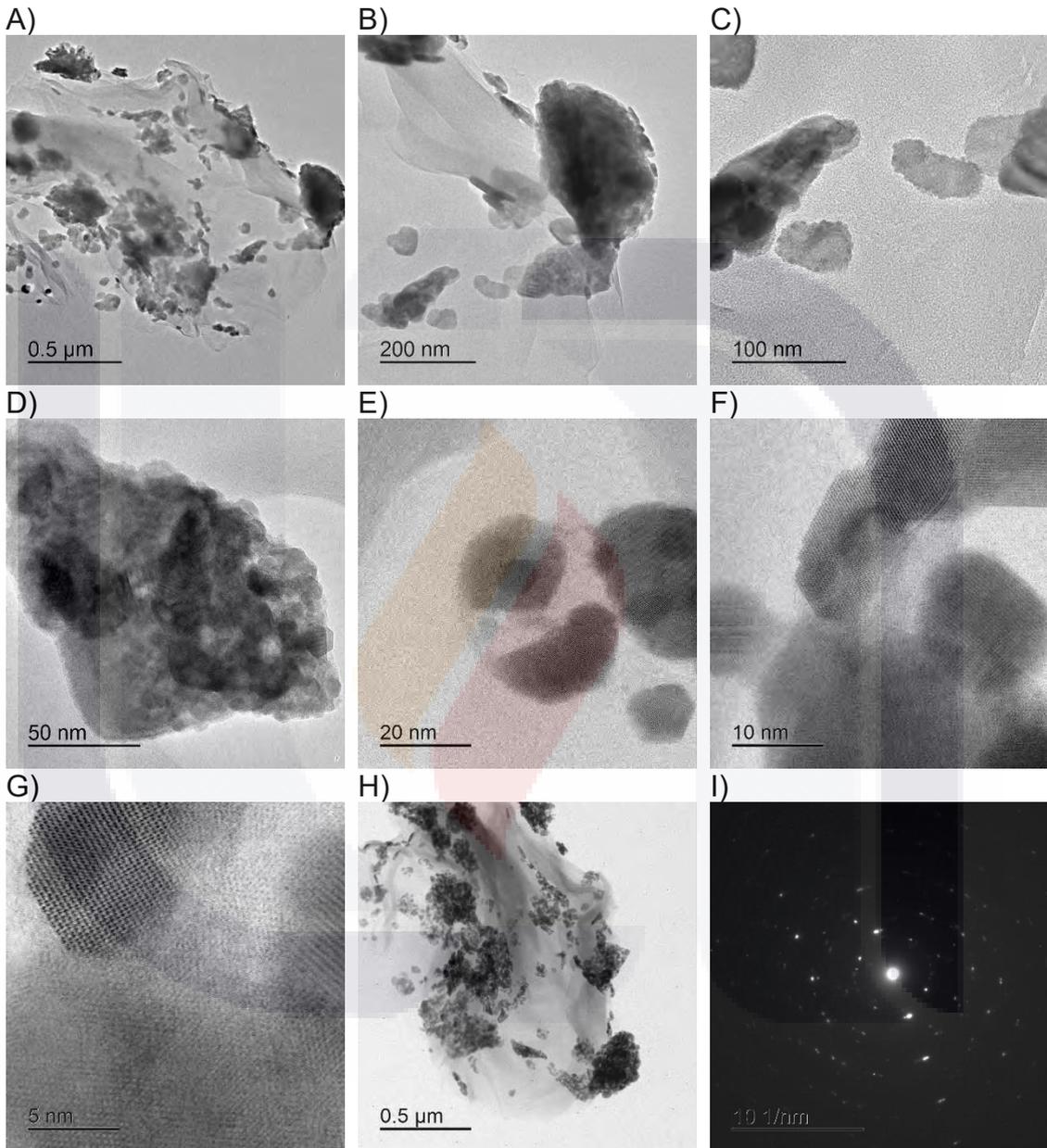


Figura 20. HRTEM de BiOCl/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D de las microflores a altas magnificaciones, B, C) imágenes BiOCl/GO en microflor y otras estructuras jerárquicas, E, F) distancias reticulares de BiOCl/GO, G, H) acercamientos de microflores de BiOCl/GO compuestas, I) Patrón SAED

Las micrografías para AgI/BiOI/GO se muestra en la Figura 21, las imágenes muestran las estructuras de las NPs obtenidas (Figura 21-A, B, C), donde se muestra la perdida de la estructura de microflor. La Figura 21-D expone

nanoláminas más detalladas. Las Figuras 21-E y F presentan las distancias interplanares que coinciden con 0.27 nm. Algunos acercamientos se pueden observar en las Figuras 21-G y H, donde es posible apreciar partículas mucho más pequeñas incrustadas sobre la superficie del material. Por último, la Figura 21-I presenta el patrón SAED que coincide con los planos (1 1 0) y (2 0 0).

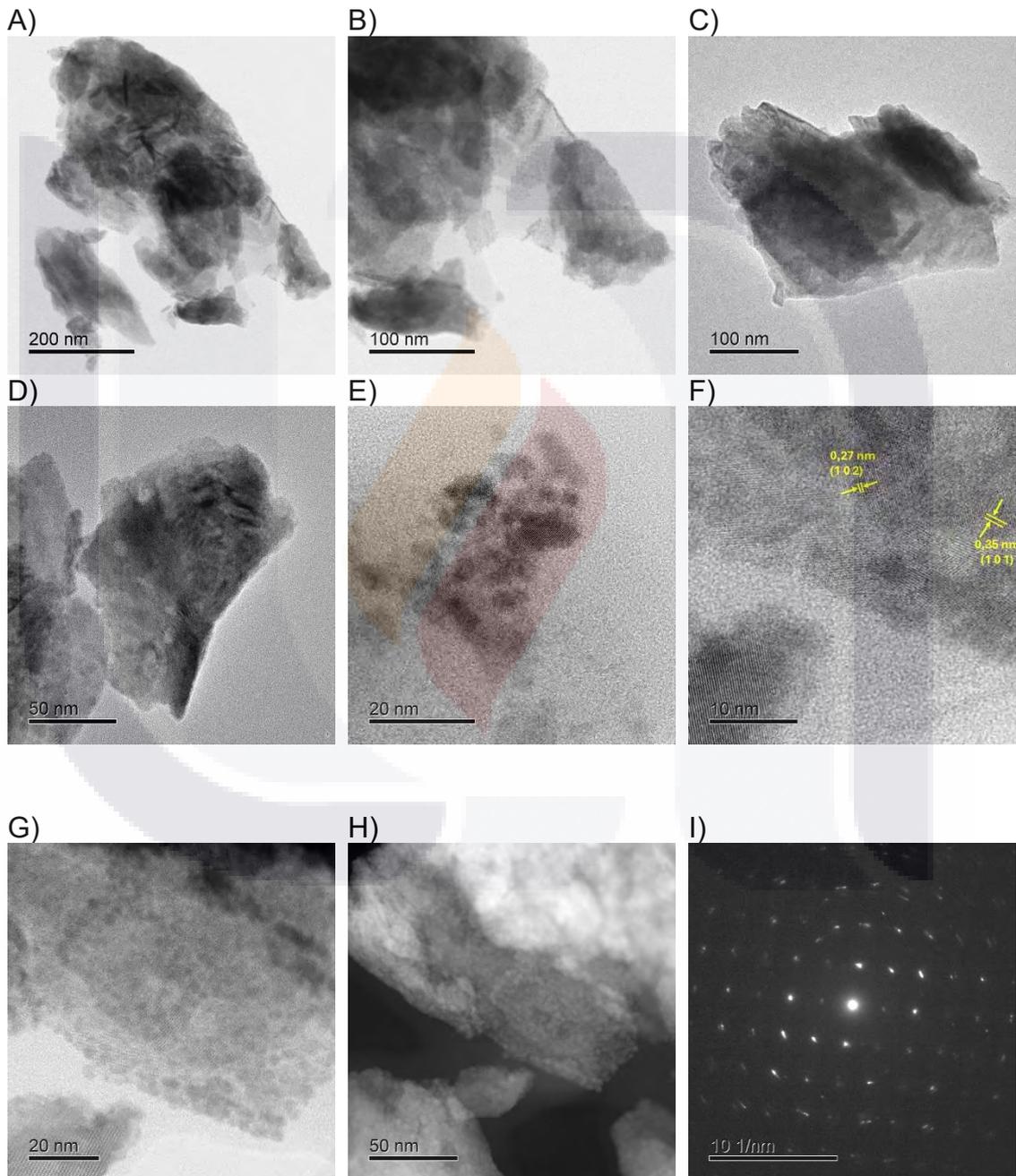


Figura 21. HRTEM de AgI/BiOI/GO a diferentes magnificaciones. A) estructura 3D del material. B, C) imágenes de de AgI/BiOI/GO y otras estructuras. E, F) distancias reticulares de AgI/BiOI/GO, G, H) acercamientos de microflores de AgI/BiOI/GO, I) Patrón SAED.

Para AgCl/BiOCl/GO. La Figura 22-A se muestra la estructura 3D donde se distingue la microflor compuesta por nanopétalos. La Figura 22-B y C muestran magnificaciones que permiten observar los nanopétalos. La Figura 22-D permite observar la lámina de GO y sobre su superficie las estructuras de BiOCl distribuidas. Las Figura 22-E y F muestran las distancias reticulares del material, encontrada en 0.35 nm. Las Figuras 22-G y H también permiten observar pequeñas partículas distribuidas sobre los pétalos. Finalmente, la Figura 22-I muestra el patrón SAED que presenta los planos (1 0 1) y (2 0 0).

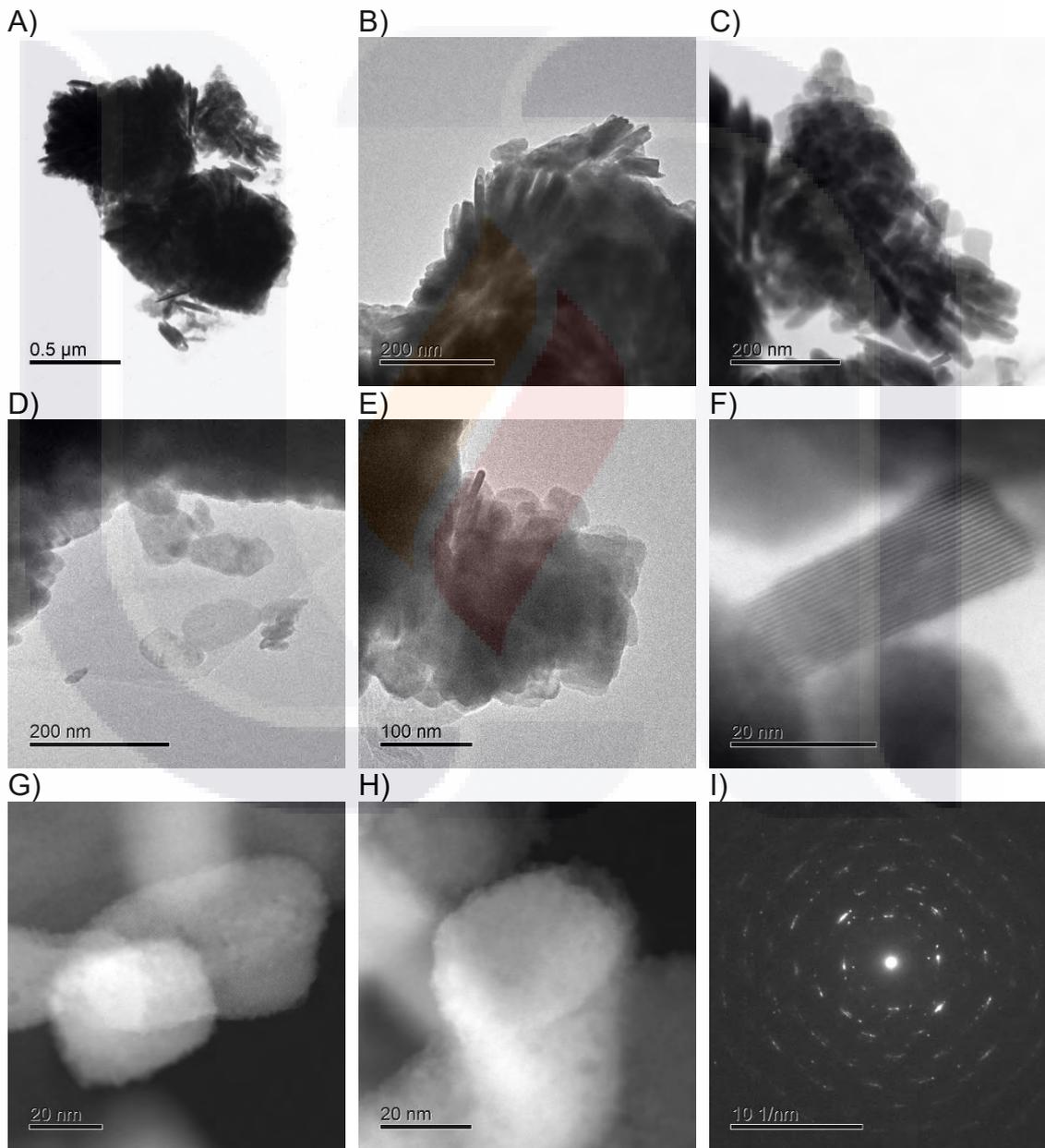


Figura 22. HRTEM de AgCl/BiOCl/GO. A) Estructura 3D del material. B, C) Nanopétalos de BiOCl. D) BiOCl sobre la superficie de GO. E, F) Distancias reticulares de Agl/BiOI/GO, G, H) Magnificaciones de nanopétalos, I) Patrón SAED.

7.3.3. Microscopía de fuerza atómica (AFM)

Las micrográficas de AFM de la Figura 23 muestran las imágenes de sensor de altura para los materiales. Se puede observar la distribución de las partículas de manera uniforme con algunas aglomeraciones. La GA la cual se utilizó como material de inmersión para depositar las películas delgadas de nanomateriales sobre la superficie de un portaobjetos de vidrio (Figura 23–A, D) se observa que alcanza tamaños de 4.5 nm.

En la Figura 23–B se pueden apreciar posibles cúmulos de BiOI a una escala de 130 nm, se distinguen estructuras esféricas formando dichos cúmulos con alturas de hasta 67.7 nm (Figura 23–E). Para el caso de los materiales de BiOCl, a escala de 270 nm se distinguen cúmulos pequeños distribuidos sobre la superficie de la GA (Figura 23–C), en la imagen 3D se presentan tamaños de 12.5 nm (Figura 23–F).

Por otro lado, el GO (Figura 23–G) presentó estructuras con alturas de hasta 6.3 nm (Figura 23–J). Los compósitos de los materiales de BiOI/GO se aprecian en la Figura 23–H de manera similar que los materiales prístinos se distinguen agrupaciones, pero con alturas menores de 12.9 nm (Figura 23–K). Por último, los compósitos de los materiales de BiOCl/GO se muestra en la Figura 23–I donde se aprecian las láminas nanométricas sobre toda una superficie, alcanzando alturas de 7.5 nm (Figura 23–L).

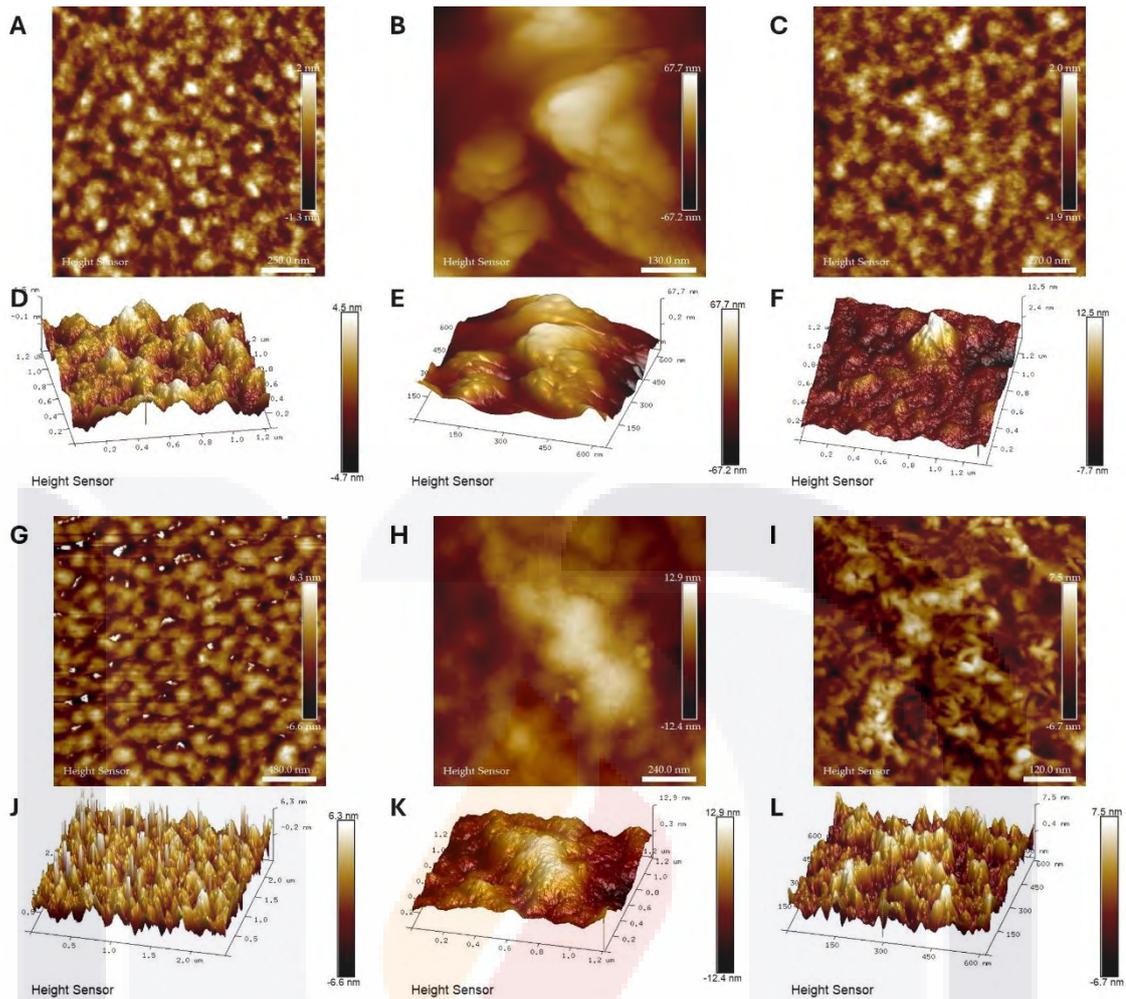


Figura 23. Análisis AFM de sensor de altura para todos los materiales. A,D) GA, B,E) BiOI, C,F)BiOCl, G,J) GO, H,K) BiOI/GO I,L) BiOCl/GO

7.3.4. Análisis Infrarrojo (FT-IR)

El espectro FT-IR para confirmar la pureza del material se presenta en la Figura 24. Primeramente, se realizó el análisis después de un lavado sencillo de etanol-agua el cual está reportado en los gráficos trazados en negro y posteriormente se realizó un lavado con etanol-acetona y reflujo para eliminar cualquier contaminante, el resultado se presenta en la gráfica con línea roja. En la Figura 24–A se muestran los resultados para el BiOI donde se observa que algunas señales se intensificaron después del lavado y algunas otras disminuyeron, principalmente en la región cercana a 400 cm^{-1} . La Figura 24–B muestra los resultados para BiOI/GO en este caso se intensificaron algunas señales del material. La Figura 24–C contiene los resultados para BiOCl y la Figura 24–D para BiOCl/GO, en estos materiales no se observó ningún cambio aparente entre

los materiales con lavado sencillo y los lavados con reflujo. En la Figura 24-E muestra el espectro para AgI/BiOI/GO en este caso el material se comparó contra el material calcinado a 300°C por 3 h. Por último, la Figura 24-F presenta los espectros para el GO donde únicamente se observa que el material adquiere más humedad al ser lavado con reflujo.

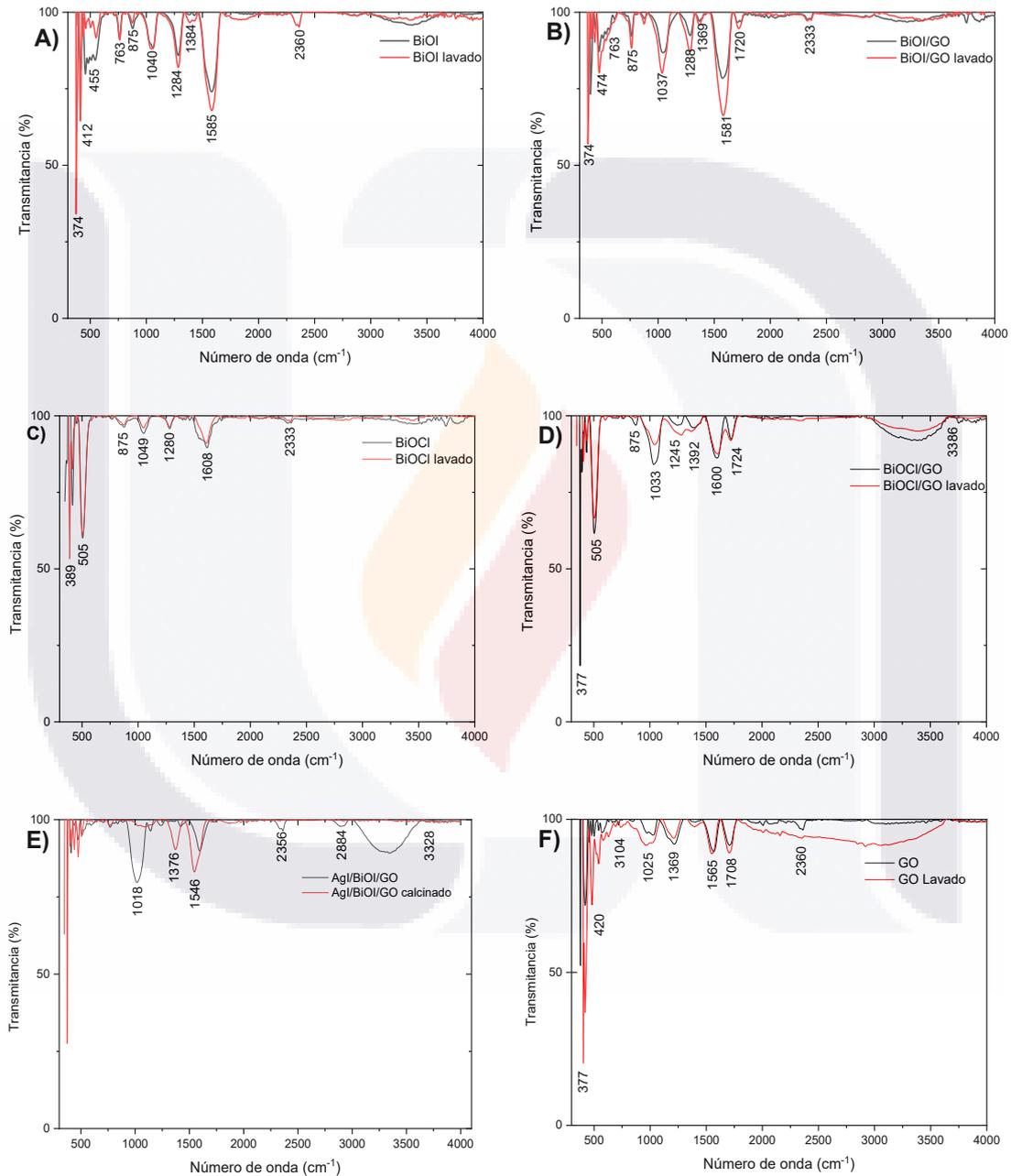


Figura 24. Espectros FT-IR del material puro y en compuesto. A) BiOI, B) BiOI/GO, C) BiOCl, D) BiOCl/GO, E) AgI/BiOI/GO F) GO.

7.3.5. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X ayuda a obtener información sobre la fase y la estructura del cristal. En la Figura 25–A se muestran los difractogramas del BiOI y BiOI/GO y en la Figura 25–B del BiOCl y BiOCl/GO. En la Tabla 7, se reportan las tarjetas a las que corresponden las fases cristalinas usando el programa match.

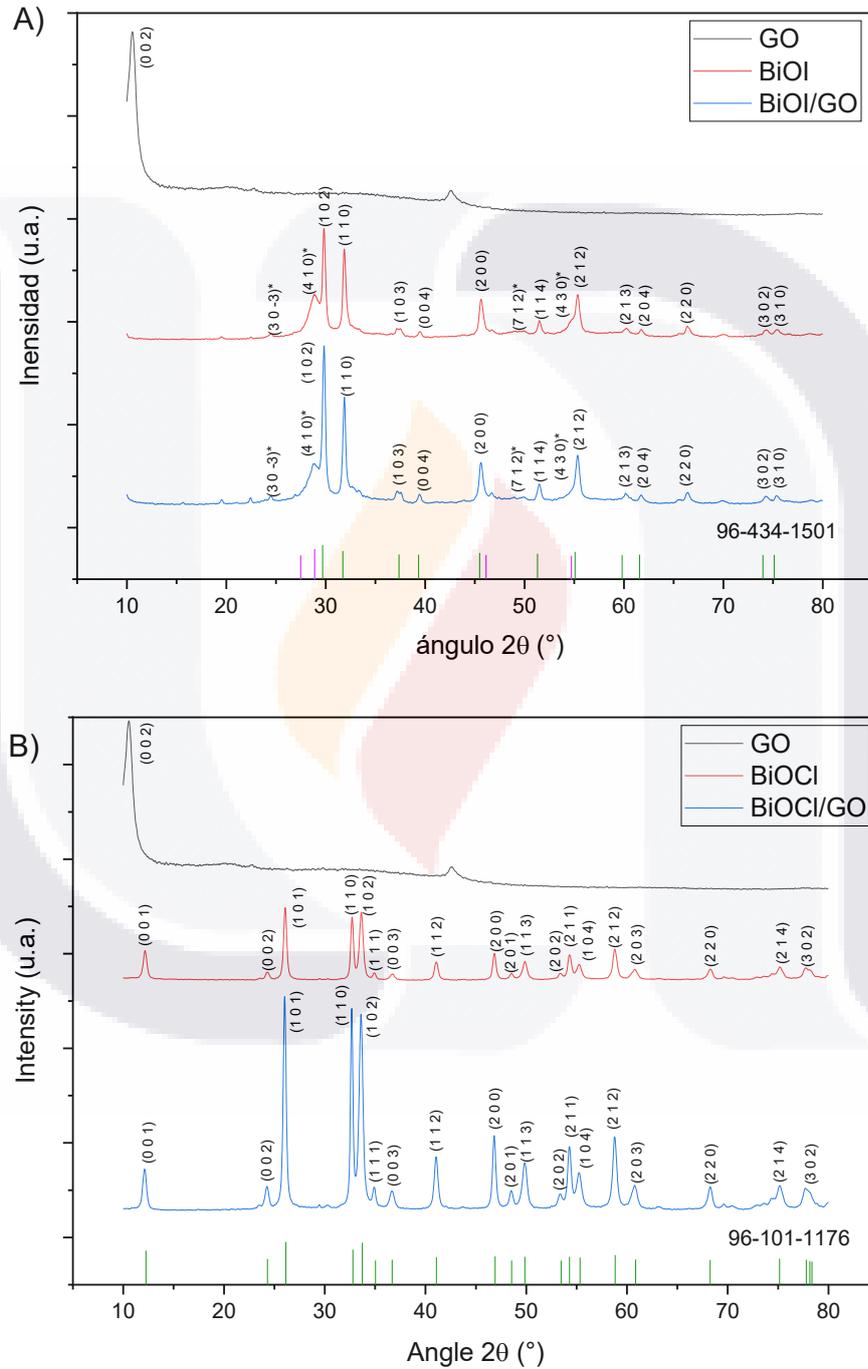


Figura 25. DRX y cartas cristalográficas de los oxihalogenuros de bismuto A) BiOI (rojo) BiOI/GO (azul) GO (negro). B) BiOCl (rojo) BiOCl/GO (azul) GO (negro)

El tamaño del cristal de las estructuras puede ser determinado mediante la ecuación de Debye – Sherrer, $L = K\lambda/\beta\cos\theta$ donde: L= tamaño promedio del cristal, K = factor de forma del cristal (0.94), λ = longitud de onda de los rayos (1.54184 nm), β = corrección del ancho a la mitad de la reflexión máxima de la DRX y θ = ángulo de la difracción. Los tamaños de cristal calculado se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Fases cristalinas para los patrones DRX de BiOX.

Material	Fase	Tamaño del cristal	Carta cristalográfica
BiOI	Tetragonal	35 nm	96-434-1501
Bi₄O₅I₂	Monoclínica		96-810-4104
BiOCl	Tetragonal	37 nm	96-101-1176

7.3.6. Espectroscopía de Reflectancia Difusa de UV-Vis (UV-DRS)

La espectroscopía de reflectancia difusa de UV-Vis se utilizó para determinar las propiedades ópticas de los materiales. El gráfico TAUC obtenido para el caso del BiOI y BiOI/GO se presenta en la Figura 26-A mientras que para el BiOCl y el BiOCl/GO se reporta en la Figura 26-B. Los valores obtenidos de Band Gap se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de Band Gap para BiOI y BiOCl

Material	Band Gap (eV)
BiOI	1.8
BiOI/GO	1.4
BiOCl	3.4
BiOCl/GO	2.9

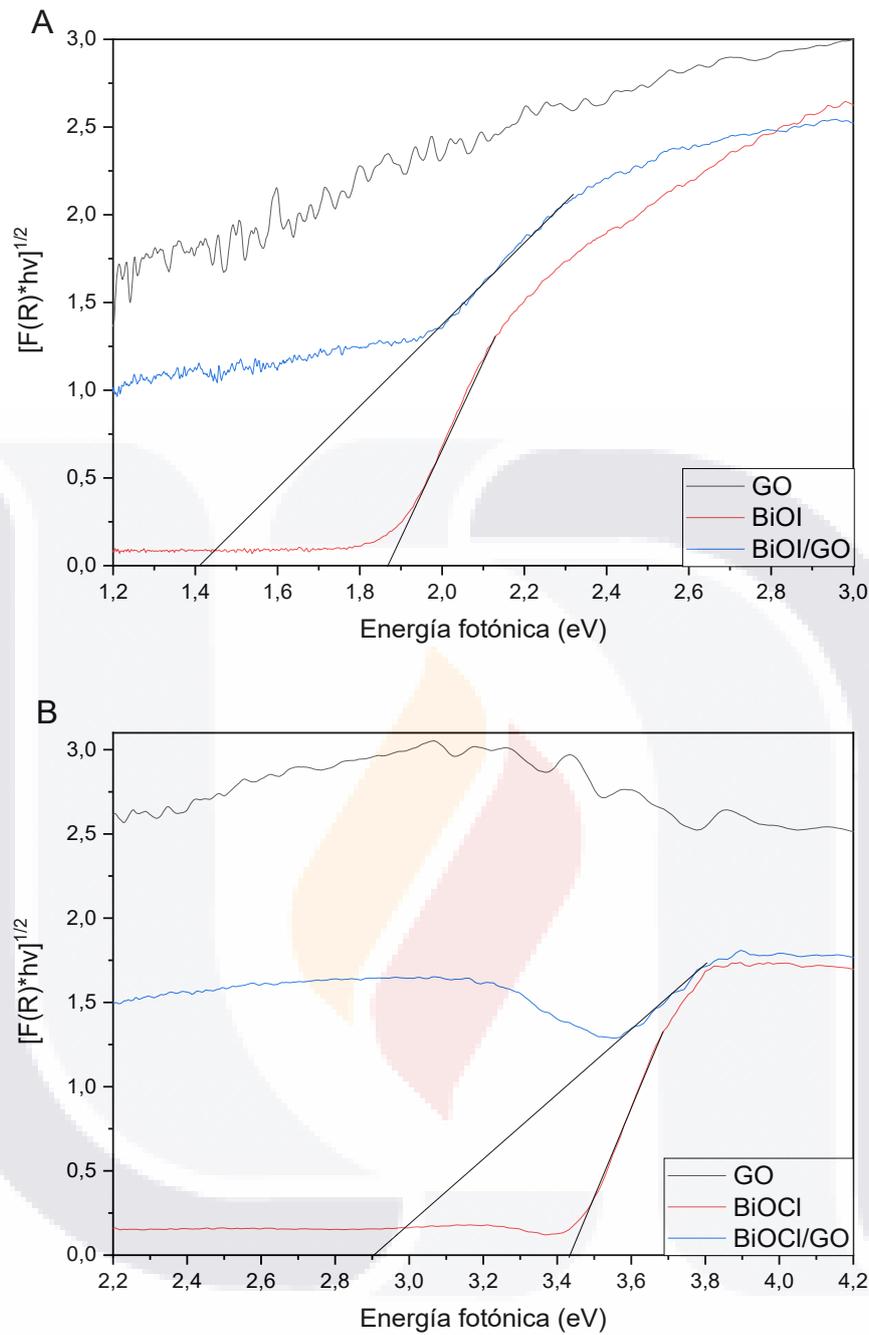


Figura 26. Representación de Tauc Plot para las estructuras de A) BiOI (rojo), BiOI/GO (azul) y GO (negro). B) BiOCl (rojo), BiOCl/GO (azul) y GO (negro).

7.3.7. Análisis de área superficial S_{BET}

Para determinar S_{BET} , se obtuvieron las isothermas de adsorción–desorción de nitrógeno de cada uno de los materiales. La Figura 27 muestra las curvas de histéresis obtenidas de cada material donde se aprecia que todos los materiales son mesoporosos con isothermas de tipo IV. La Figura 27 – A muestra el análisis para GO. La Figura 27–B y 27-D presentan las isothermas de BiOI y BiOI/GO,

respectivamente, donde se observan ciclos de histéresis H4. Las Figuras 27–C y E muestran las isothermas de BiOCl y BiOCl/GO con ciclos de histéresis H3, en las cuales aparentemente se presentan estructuras de poros desordenados. En los recuadros anexos a la Figura 27, se muestra el gráfico correspondiente a la distribución de tamaño de poro, la cual confirma que los materiales son mesoporosos, con diámetros de poro de tamaños distribuidos en un rango menor a 5 nm.

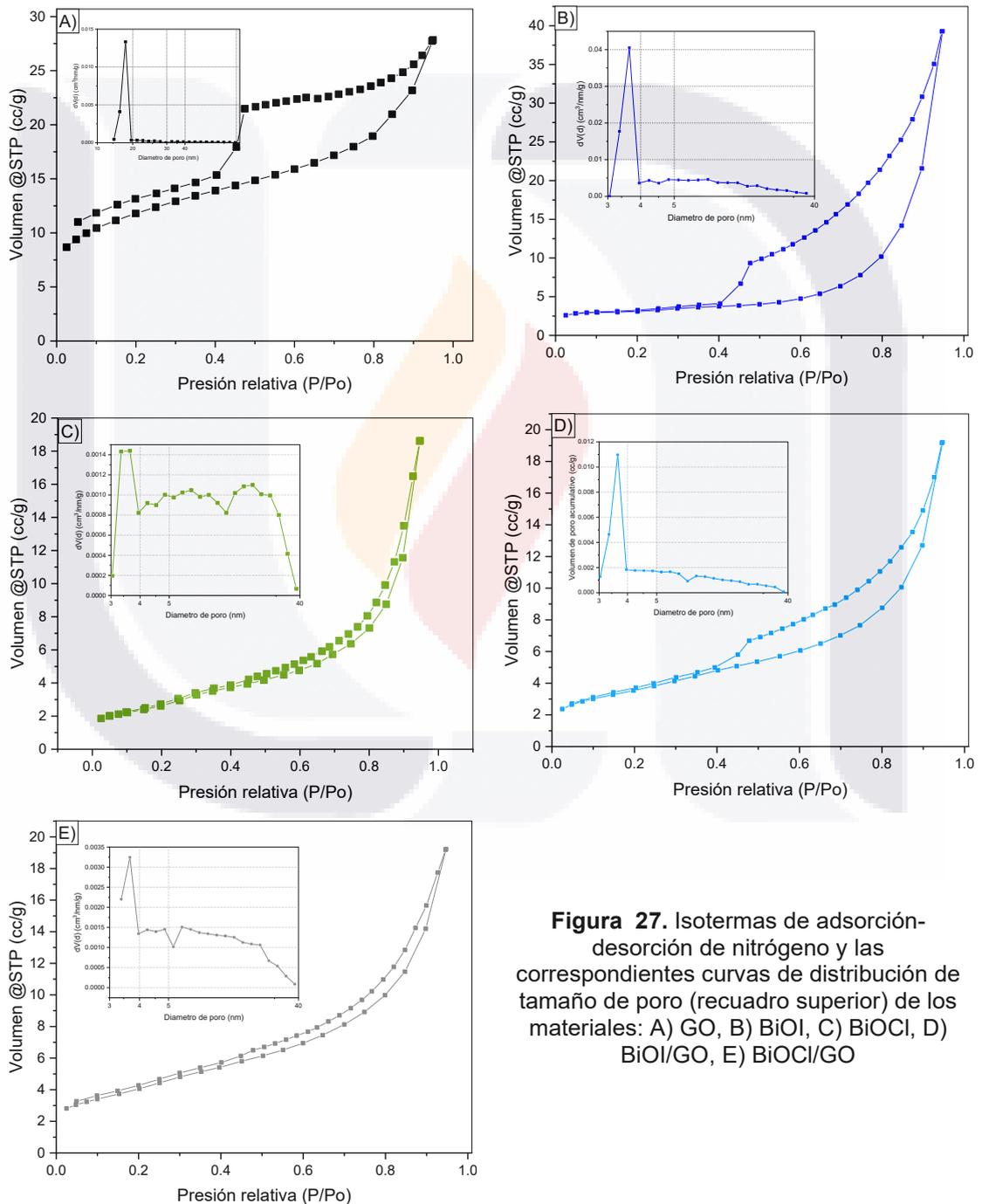


Figura 27. Isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno y las correspondientes curvas de distribución de tamaño de poro (recuadro superior) de los materiales: A) GO, B) BiOI, C) BiOCl, D) BiOI/GO, E) BiOCl/GO

Por otro lado, en la Tabla 9 se presentan los datos obtenidos de las propiedades superficiales de todos los materiales, el área superficial BET muestra que BiOI tiene un área superficial específica cercana a 20 m²/g, sin embargo, esta disminuyó considerablemente al formar el compósito con GO, al igual que el volumen de poro. El compósito de BiOCl/GO mostró un aumento en esta propiedad con respecto a BiOCl.

Tabla 9. Valores de las propiedades superficiales de BiOX, GO y BiOX/GO.

Material	S _{BET} (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Diámetro promedio de poro (nm)
BiOI	29.388	0.1348	4.114
BiOCl	9.239	0.0518	15.330
BiOI/GO	24.008	0.113	4.119
BiOCl/GO	16.479	0.046	3.718
GO	42.626	0.04305	3.721

7.3.8. Análisis electroquímico

Se realizaron mediciones de voltamperometría cíclica con el propósito de conocer las propiedades electroquímicas de cada material. La técnica se basa en aplicar un barrido de potencial al electrodo de trabajo, tanto en sentido positivo como en sentido negativo, para caracterizar el sistema electroquímico, útil para estudiar procesos redox, los resultados se presentan en los voltamperogramas de la Figura 28.

En la Figura 28–A muestra el voltamperograma de BiOI. En esta se distingue un par de picos bien definidos cerca de -0.71 V y -0.33 V, se observa un desplazamiento y mejoras en el potencial REDOX al ser irradiado con luz. La Figura 28–B muestra el voltamperograma para BiOI/GO los picos REDOX no se aprecian, pero la presencia de luz exhibe un desplazamiento. La Figura 28–C presenta el voltamperograma para BiOCl con picos igualmente cercanos a -0.7 V tanto en luz como en oscuridad. La Figura 28–D presenta el voltamperograma para BiOCl/GO con dos picos cercanos a -0.25 V cuando es irradiado con luz.

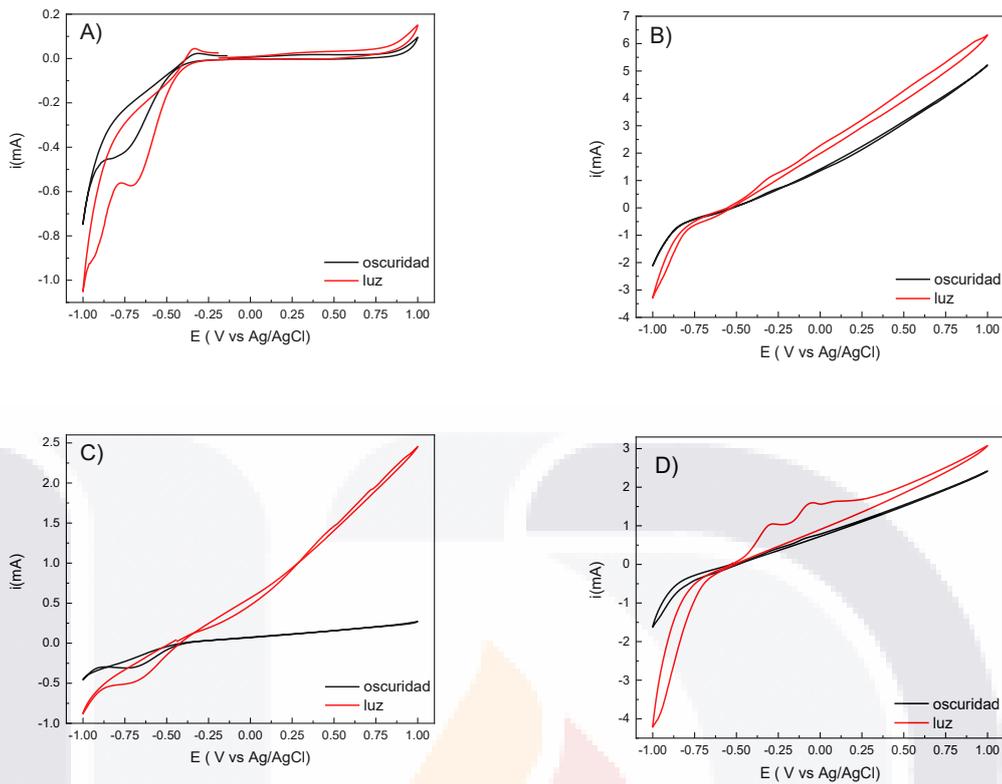


Figura 28. Voltamperometría cíclica de los materiales en oscuridad (gráfico negro) e irradiados con luz (gráfico rojo). A) BiOI, B) BiOI/GO, C) BiOCl, D) BiOCl/GO

7.4. Evaluación de la actividad antibacteriana

Las primeras pruebas de actividad antimicrobiana se realizaron con el fin de encontrar una concentración inhibitoria aproximada, el tiempo de interacción necesario y empleando la técnica de goteo. Se utilizaron concentraciones de 20, 60 y 125 $\mu\text{g/mL}$ de los materiales de BiOI y BiOCl. Los resultados se muestran en la Figura 29. Para el caso de BiOI se logró encontrar una inhibición de *S. aureus* (Figura 29-A) en aparentemente 5 h de interacción a la concentración de 125 $\mu\text{g/mL}$.

Por otro lado, el BiOCl logró el efecto de inhibición de crecimiento de *S. aureus* a la concentración de 20 $\mu\text{g/mL}$ en 5 h y a 60 $\mu\text{g/mL}$ se logró a las 2 h (Figura 29-B), observando además que a concentraciones mayores el efecto de inhibición para BiOCl disminuye o es nulo.

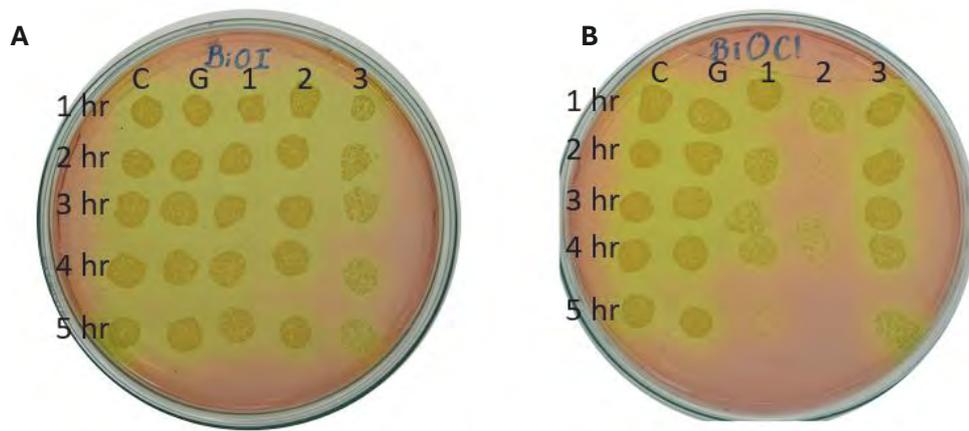


Figura 29. Resultados de interacción de nanomateriales con *S aureus*, C: control PBS G: control GA, 1: 20 µg/mL. 2: 60 µg/mL. 3: 125 µg/mL. Interacción con BiOI (A) y BiOCl (B)

Con las concentraciones inhibitorias de la prueba preliminar, se procedió a realizar las pruebas de inhibición con la técnica de dispersión de UFC, se probaron concentraciones desde 25 hasta 500 µg/mL para los materiales prístinos y sus compósitos con el GO, con el fin de determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI) y una concentración mínima bactericida (CMB) para todos los materiales. La Figura 30 muestra los resultados de todas las interacciones después de la exposición a los nanomateriales en 5 h con irradiación de luz visible. Se realizó el análisis estadístico de dos vías de comparación múltiple empleando el programa GraphPad Prism 7.00 para obtener las diferencias significativas contra el control GA.

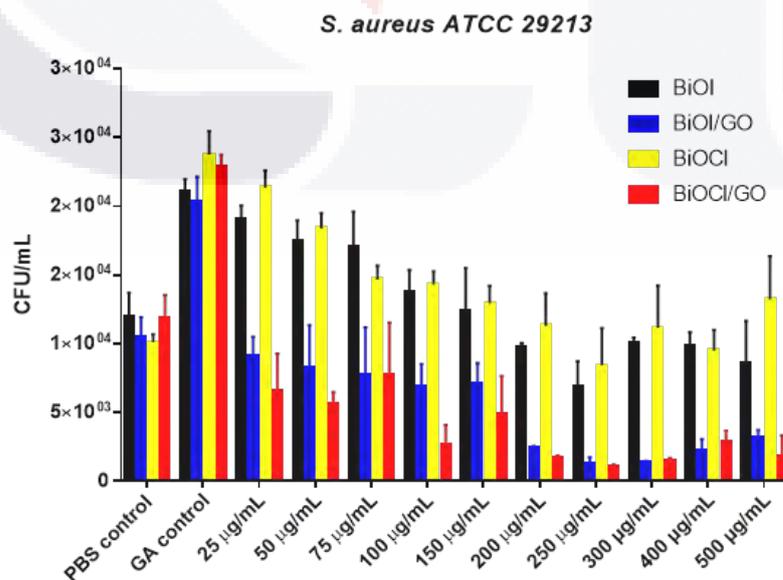


Figura 30. Resultados de inhibición de *S. aureus* con 5 h bajo irradiación con luz visible con las concentraciones de 25 a 500 µg/mL

Al tener las CMI de los materiales y observar que el material pierde efectividad al aumentar la concentración, se aumentó el tiempo de interacción a 8 h con los mismos parámetros de interacción. Se probaron las concentraciones 25, 50, 100 y 200 µg/mL con el fin de encontrar la CMB (Figura 31).

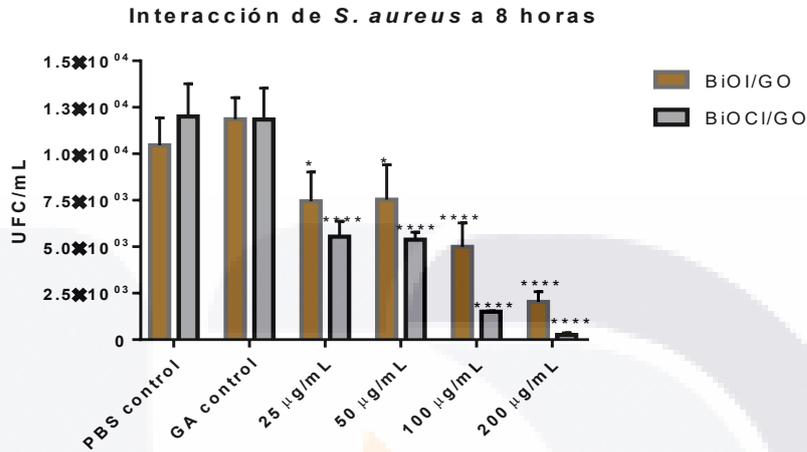


Figura 31. Resultados de inhibición de *S. aureus* con 8 h bajo irradiación con luz visible con las concentraciones de 25 a 200 µg/mL

Del mismo modo que los compósitos de BiOX/GO, también se realizó el estudio con los compósitos de AgX, sin embargo, no se obtuvieron resultados favorables, siendo muy elevada la concentración de los microorganismos (incontables), en la Figura 32 se muestran los resultados de la prueba (Figura 32).

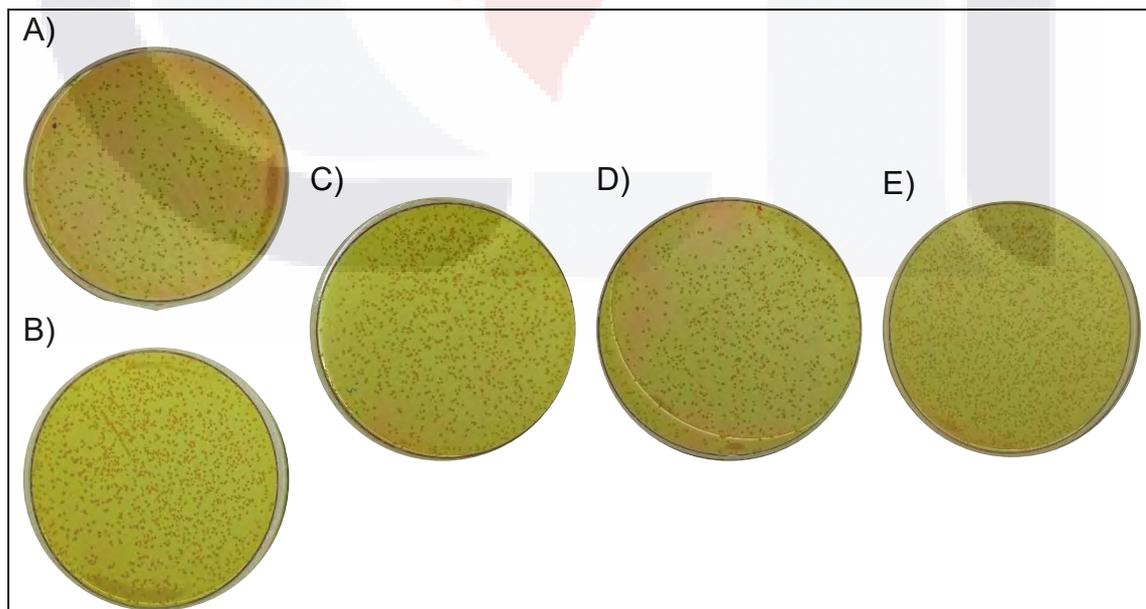


Figura 32. Resultados de la interacción de *S. aureus* con los compósitos de AgI/BiOI/GO con irradiación de luz visible. A) control 1.5 × 10⁴ UFC/mL. B) Control GA. C) 25 µg/mL. D) 50 µg/mL. E) 100 µg/mL

El resumen de los resultados obtenidos para la CMI y CMB para cada material se presentan en la tabla 10, donde se reporta la CMI para todos los materiales, siendo los más efectivos los compósitos BiOI/GO y BiOCl/GO mismos de los cuales también se encontró la CMB.

Tabla 10. CMI y CMB para cada material sintetizado.

MATERIAL	CMI	CMB
BiOI	100 µg/mL	
BiOCl	50 µg/mL	
BiOI/GO	25 µg/mL	> 200 µg/mL
BiOCl/GO	25 µg/mL	200 µg/mL
AgI/BiOCl/GO	50 µg/mL	
AgCl/BiOCl/GO	50 µg/mL	

7.5. Evaluación de la toxicidad

La prueba para la determinación de la toxicidad de las NPs de BiOX y BiOX/GO (X = I ó Cl) se realizó mediante ensayos de viabilidad celular. Se realizaron los ensayos de CCK-8 y LDH. El primero permite determinar la cantidad de células vivas por la producción de colorante formazán por las deshidrogenasas de las células viables, mientras que el ensayo de lactato deshidrogenasa (LDH), consiste en una enzima citosólica presente en varios tipos de células la cual se libera en el medio de cultivo celular tras el daño a la membrana plasmática.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 33, para el ensayo CCK-8 los materiales de BiOI provocaron una disminución en la viabilidad celular a partir de 40 µg/mL en 24 h de interacción (Figura 33–A), mientras que para el material de BiOI/GO se presentó una disminución hasta los 100 µg/mL (Figura 33–C). En los materiales los resultados de LDH presentaron la expresión de la enzima a partir de 10 µg/mL para BiOI comenzó a incrementar a partir de los 40 µg/mL (Figura 33–B) y para BiOI/GO a partir de 20 µg/mL (Figura 33–D).

Por otro lado, para el caso de BiOCl no se presentó una disminución en la viabilidad en ninguna de las concentraciones probadas (Figura 33–E), no así para el BiOCl/GO el cual presenta disminución a partir de 30 µg/mL (Figura 33–G). Para estos materiales los ensayos de LDH presentaron una baja expresión para la enzima (Figura 33– F G).

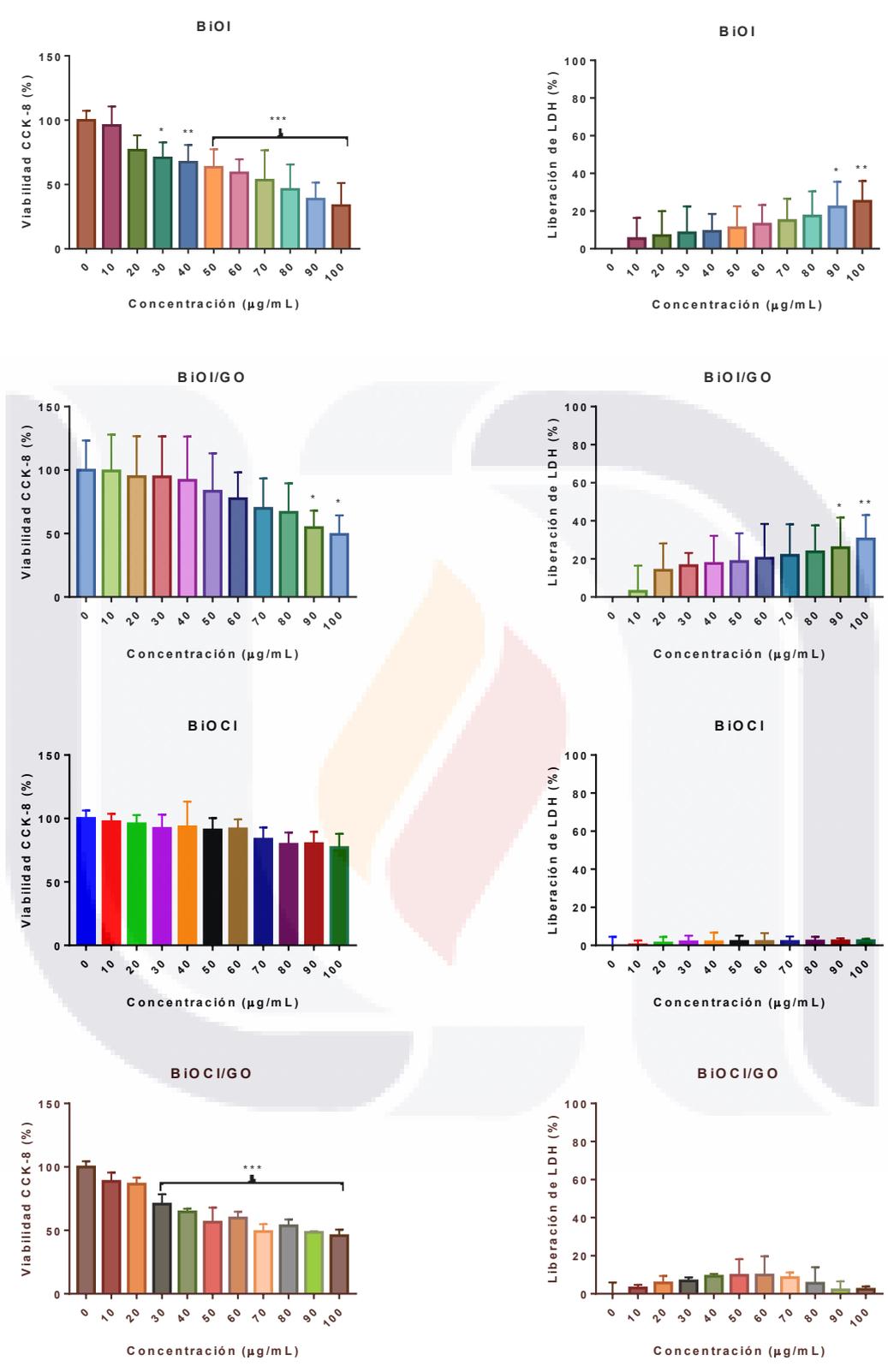


Figura 33. Determinación de viabilidad celular por el ensayo CCK-8 (izquierda) y ensayo LDH (derecha) posterior a la exposición a los materiales de BiOI, BiOI/GO, BiOCl y BiOCl/GO. Los resultados fueron obtenidos de 3 experimentos independientes realizados por duplicado, cada barra representa la media ± DE (*p< 0.05, **p< 0.001), ANOVA de una vía, Bonferroni.

7.6. Pruebas de desinfección de aire

Los muestreos de aire se llevaron a cabo en la unidad médica didáctica de la Universidad Autónoma de Aguascalientes con ayuda del impactador ambiental de cascada Andersen en los meses de noviembre y marzo, a las 11:00 de la mañana, donde al momento del muestreo todas las áreas se encontraban con actividades habituales, se registró un flujo de 25 personas aproximadamente entre pacientes y profesionales de la salud. El muestreador fue colocado al centro de la clínica a una altura de aproximadamente un metro sobre el suelo (Figura 34).



Figura 34. Impactador de cascada de Andersen en el muestreo de la clínica dental.

Los resultados de las UFC impactadas en el agar Mueller Hinton se registró pasadas 24 h de incubación después del muestreo. En la Figura 35 se puede observar una gran cantidad de microorganismos en los muestreos sin filtro, los cuales se reducen drásticamente con la incorporación del filtro, independientemente de la composición de NPs. Sin embargo, si se observa un aparente aumento en la eficiencia con los compósitos de GO.

Nivel	Sin Filtro	BiOI	BiOI/GO	BiOCl	BiOCl/GO
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Figura 35. Bacterias impactadas en agar Mueller Hinton en un muestreo de aire, sin filtro y con el uso del filtro de los diferentes materiales BiOI, BiOI/GO, BiOCl y BiOCl/GO

La comparación de los resultados obtenidos de los muestreos realizados con y sin el uso de filtros reveló una notable reducción en la cantidad de unidades formadoras de colonia por metro cúbico (UFC/m³), destacando la efectividad de los materiales BiOI y BiOI/GO en la remoción de microorganismos del aire. Estos resultados, resumidos en la Tabla 11, muestran cómo el material BiOI logró disminuir las UFC/m³ de 1119 ± 489 a 58 ± 44, lo que representa una reducción del 95% en la concentración de microorganismos presentes en el ambiente. Por otro lado, el material compuesto BiOI/GO demostró una mayor eficacia, reduciendo las UFC/m³ de 1119 ± 489 a tan solo 41 ± 18, alcanzando así una impresionante eficiencia de desinfección del 96%.

Tabla 11. Resultados de UFC/m³ en las muestras de aire sin filtro y con filtro de los materiales BiOI y BiOI/GO.

Nivel	Sin filtro	BiOI	BiOI/GO
1	204 ± 103	10 ± 12	7 ± 2
2	174 ± 112	6 ± 6	6 ± 1
3	202 ± 48	12 ± 14	10 ± 5
4	186 ± 90	9 ± 8	11 ± 6
5	254 ± 133	11 ± 6	4 ± 2
6	100 ± 48	10 ± 7	4 ± 7
TOTAL	1119 ± 489	58 ± 44	41 ± 18

En la Tabla 12 se presentan los resultados para los materiales de BiOCl y BiOCl/GO donde se observa con el uso del filtro de BiOCl la concentración disminuyó de 775 ± 147 a 212 ± 106 UFC/m³ logrando un 79% de remoción de microorganismos del ambiente. Por otro lado, el BiOCl/GO presento mejores resultados pasando de 775 ± 147 a 33 ± 10 UFC/m³ siendo más efectivo con un 97% de remoción de microorganismos en el aire (desinfección). Los resultados de eficiencia de desinfección se resumen en la Figura 36.

Tabla 12. Unidades Formadoras de Colonia por metro cubico en las muestras de aire sin filtro y con filtro de BiOCl y BiOCl/GO

Nivel	Sin filtro	BiOI	BiOI/GO
1	132 ± 67	21 ± 7	6 ± 8
2	87 ± 10	6 ± 2	5 ± 7
3	217 ± 70	37 ± 42	5 ± 7
4	144 ± 1	55 ± 2	8 ± 2
5	134 ± 23	46 ± 15	9 ± 3
6	61 ± 3	47 ± 20	0 ± 0
TOTAL	775 ± 147	212 ± 106	33 ± 10

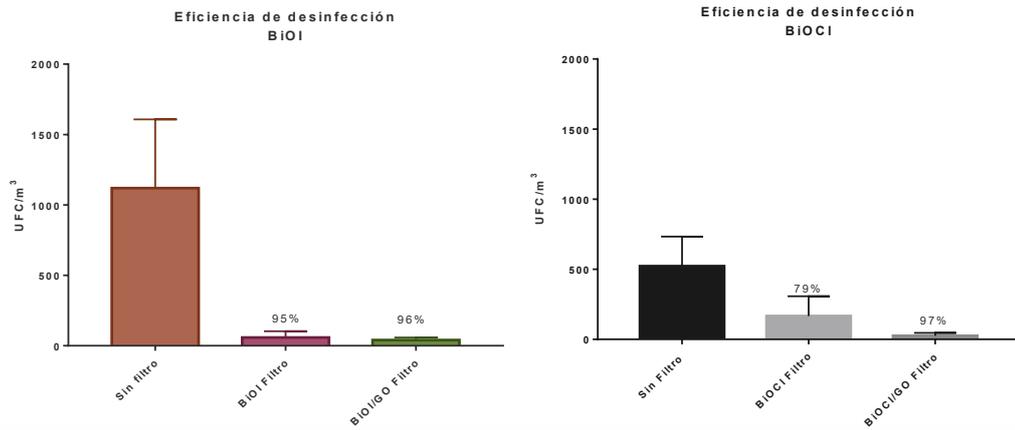


Figura 36. Eficiencia de desinfección de unidades formadoras de colonia en los muestreos de aire sin filtro y con los filtros

El objetivo del impactador de cascada de Andersen es diferenciar entre las bacterias respirables y las no respirables según el nivel de impactación. Los niveles 1 y 2 corresponden a microorganismos no respirables y los niveles del 3 al 6 los respirables.

La Figura 37 muestra los resultados obtenidos en cada nivel de impactación para los muestreos con el uso de los filtros BiOI y BiOI/GO, reportando que la mayor cantidad de los organismos impactados se encuentran clasificados como bacterias respirables, incluso se muestra que la mayoría de los microorganismos se centraron en el nivel 5. Por otro lado, se demostró que con los filtros se lograron disminuir considerablemente la cantidad de microorganismos presentes en aire en cada uno de los niveles.

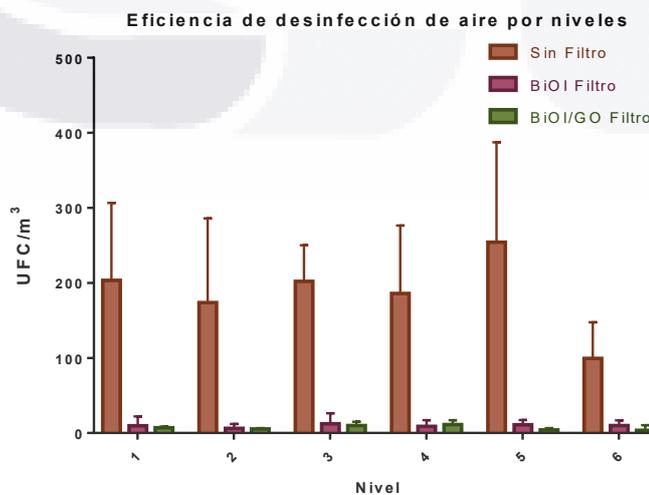


Figura 37. UFC/m³ en los seis niveles del impactador de cascada de Andersen sin filtro (café) y con los filtros de BiOI (morado) y BiOI/GO (verde).

La Figura 38 muestra los resultados para los filtros BiOCl y el BiOCl/GO. Nuevamente la mayoría de los microorganismos se clasifican como bacterias respirables. Sin embargo, también se expuso que los filtros lograron bajar la carga microbiana presente.

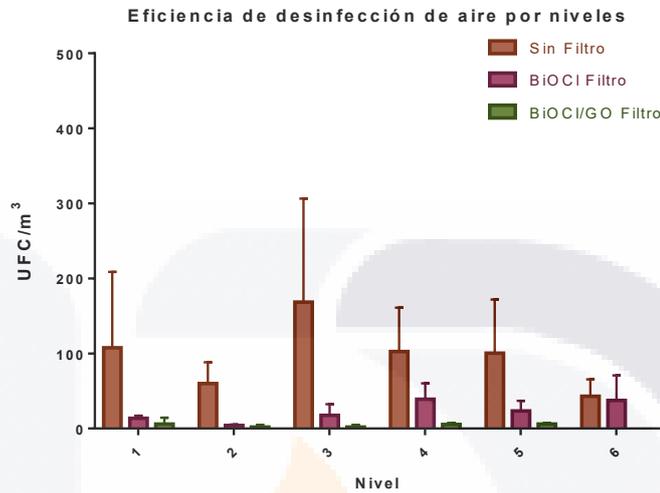


Figura 38. UFC/m³ en los seis niveles del impactador de cascada de Andersen sin filtro (café) y con los filtros de BiOCl (morado) y BiOCl/GO (verde).

7.7. Diseño y construcción del filtro de aire

Para el diseño del reactor fotocatalítico se tomaron en cuenta algunas de las consideraciones previamente mencionadas, priorizando aquellas que complementan los objetivos de desinfección. Se diseñó un reactor con una configuración de lecho empacado, en el cual se colocó el primer prototipo que consiste únicamente en el tubo de vidrio empacado. La fuente de luz utilizada para activar la fotocatalisis fue una combinación de luces LED visibles y UV de 5:1. La localización de la lámpara se ubicó fuera del reactor a una distancia de 2.5 cm. Finalmente, se utilizó una bomba de vacío para dirigir el flujo sobre la superficie del material dentro del reactor (Figura 39).

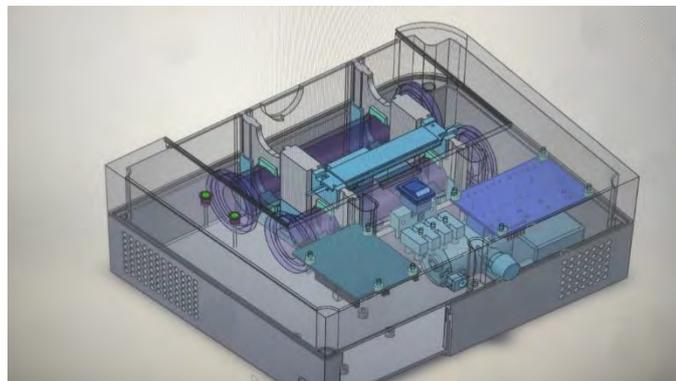


Figura 39. Diseño digital en 3D del filtro de aire para transporte público.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Para establecer el modelo cinético de operación del sistema se deben considerar varios aspectos importantes como es el flujo de aire a través del sistema, la superficie de contacto con el material fotocatalítico, el tiempo de operación y de retención de los contaminantes. Los resultados obtenidos en los muestreos del primer prototipo se utilizaron para fijar una operación de los filtros diseñados se fijaron 15 min de operación de la bomba o el ventilador centrifugado y 3 h de irradiación al filtro fotocatalítico, los parámetros pueden ser modificados de acuerdo a los niveles de contaminación del área a muestrear.

Se puede obtener la eficiencia de manera indirecta cuando se desea filtrar aire, conociendo la cantidad inicial de microorganismos (N_0), las características del filtro que tiene una longitud de 15 cm y el aire tienen un flujo de 8 LPM, la $L_{90} = 13$ cm.

7.8. Desinfección con los modelos diseñados

Para el proceso de muestreo con el prototipo se siguió la operación normal del filtro diseñado, acoplando el impactador de cascada de Andersen de 6 niveles en cada ciclo de desinfección, como se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Muestra de prototipo del transporte público con el impactador de cascada de Andersen de seis niveles.

Los muestreos se llevaron a cabo en clínicas de estomatología, con operación normal, un flujo de personas de 30 entre pacientes y doctores, se comenzó el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

primer muestreo a las 8:00 am y se concluyó a las 3:00 pm, tomando los muestreos cada 3 h en un ciclo de desinfección. Los resultados se muestran en la Figura 41, donde se puede observar que en el muestreo sin filtro se encontraron altas cantidades de unidades formadoras de colonia y la disminución de la carga se observa a partir del primer ciclo de desinfección.

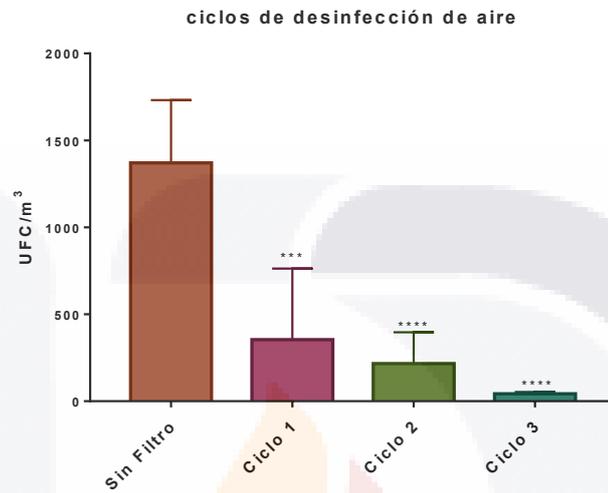


Figura 41. Resultados del proceso de desinfección con los prototipos diseñados en ciclos de operación.

8. DISCUSION DE RESULTADOS

8.1. Síntesis de materiales.

La ruta solvotermal asistida con microondas utilizada para la síntesis de los nanomateriales mostró un excelente rendimiento, como se detalla en la Tabla 4 de la sección de resultados. Esta metodología destaca por su eficiencia y capacidad para producir estructuras específicas con propiedades mejoradas. En el caso del BiOI, el autor He y colaboradores (2016) señala que la ruta de síntesis empleada conduce la formación de estructuras jerárquicas del tipo $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$. Estas estructuras son favorecida por las condiciones de alta temperatura, lo que promueve la formación de enlaces de oxígeno más estables y efectivos (He et al., 2016).

Para la síntesis de materiales de BiOCl, se utilizó la misma ruta solvotermal asistida con microondas, con una modificación única en los precursores utilizados. Esta modificación permitió obtener BiOCl con las características específicas, manteniendo la eficiencia y ventajas del método original. La versatilidad de la ruta de síntesis es evidente al permitir la producción de materiales con solo ajustar los precursores.

La síntesis del GO se llevó a cabo siguiendo el método de Hummers, reportado por Lee (2017), utilizando grafito como precursor. Este método es relativamente sencillo y se basa en la adición de ácidos y sales de permanganato, que facilitan la oxidación del grafito para formar el óxido de grafeno (Yu-Hsun et al., 2017). En este proceso, se logró sintetizar un material de color negro con un rendimiento de 65.2%.

Aunque el rendimiento es considerado bueno, se observó que fue afectado por la etapa de separación y purificación. Durante este proceso, el uso filtros con tamaño de poro muy pequeños es crucial para minimizar las pérdidas del material. Los poros deben ser menores a los tamaños esperados de GO para garantizar la separación eficaz y maximizar el rendimiento.

El BiOI sintetizado se presentó como un polvo fino de color naranja (Figura 10–A), lo cual concuerda con lo reportado por otros investigadores. El color del BiOI puede variar desde amarillo hasta rojo, dependiendo de las estructuras jerárquicas formadas durante la síntesis. Esta variación de color está relacionada

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

con el band gap del material, así como la presencia y disposición de oxígeno en su estructura (He et al., 2016; Xiao et al., 2014).

Por otro lado, el BiOCl obtenido se presentó como un polvo fino de color blanco (Figura 10 - B). La coloración blanca sugiere, según los autores, que este material puede ser excitado bajo la irradiación de luz ultravioleta, lo que indica su potencial aplicación en fotocátalisis activada por UV (Zhang et al., 2021).

Para la síntesis de los compósitos con GO, se añadió un paso adicional al inicio de la síntesis de los BiOX donde se incorporó una cantidad conocida de GO. Este procedimiento resultó en la obtención de compósitos con rendimientos cercanos al 90%.

Los compósitos BiOI/GO y BiOCl/GO mantuvieron características similares a los materiales prístinos, pero mostraron diferencias en sus coloraciones. El compósito BiOI/GO presentó una coloración naranja oscuro (Figura 10-C), coincidiendo con lo reportado por He (2015) en estudios previos (He et al., 2015). Esta tonalidad más oscura puede atribuirse a la interacción del GO con la matriz de BiOI, lo cual podría influir en las propiedades ópticas del material. Los BiOX pueden presentar interacciones no covalentes por interacciones de Van der Waals (D. Chen et al., 2012)

Por otro lado, el compósito BiOCl/GO adquirió un color gris (Figura 10-D), lo que sugiere modificaciones en su estructura electrónica y posibles cambios en su comportamiento óptico. Respecto a los compósitos con AgX, la formación de AgX/BiOX/GO mostró una coloración similar a la de los compósitos con GO, pero con tonalidades más brillantes, destacando la presencia de AgX (Figura 10 – E y F). Esta brillantez en los colores puede atribuirse a las propiedades ópticas únicas del AgX, que influye en la dispersión y absorción de luz, dando lugar a una apariencia más vibrante en los materiales finales (Kato et al., 2015).

La incorporación de AgI y AgCl no solo modifica la coloración, sino que también puede mejorar las propiedades fotocatalíticas y la actividad antimicrobiana de los compósitos. La presencia de AgX, junto con BiOX y GO, crea una sinergia que potencia la eficiencia en aplicaciones de purificación ambiental y desinfección (Xia et al., 2016; M. Zhu et al., 2011).

8.2. Soporte de materiales

Los materiales sintetizados, incluyendo BiOI, BiOCl, BiOI/GO y BiOCl/GO, fueron soportados sobre la superficie de perlita mediante un proceso de inmersión. Estas perlitas se emplearon posteriormente en la fabricación de un filtro de aire. El objetivo fue incorporar 500 mg de BiOX sobre 10 g de perlita. Durante el proceso, se observó un aumento de peso en las perlitas, lo que indicó una incorporación exitosa del material, aunque el aumento fue menor a lo esperado; esto se explica por la baja estabilidad del material, el soporte tiene la principal desventaja de no ser resistente al tratamiento mecánico (Saucedo-Terán et al., 2018; Valdez-Castillo et al., 2019). Sin embargo, a pesar de esta limitación, las investigaciones realizadas por nuestro grupo de trabajo han demostrado que la estructura porosa y la alta superficie disponible de la perlita continúan siendo una de las mejores opciones como soporte. Esto se debe a su capacidad para proporcionar un área superficial amplia que favorece la adhesión y distribución uniforme de los nanomateriales, lo cual resulta crucial para la efectividad del filtro de aire. (Encarnación Ambriz, 2014).

8.3. Caracterización

8.3.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)

El análisis SEM reveló estructuras de microflor en los materiales prístinos de BiOI y BiOCl (Figura 12). Las microflores están formadas por láminas que presentan espesores en el orden de los nanómetros, con un promedio de 13 ± 3 nm para BiOI y 27 ± 7 nm para BiOCl. Estas estructuras consisten en uniones ordenadas de nanoláminas o nanopétalos, que conforman la morfología característica de las microflores. La formación de microflores ha sido reportada por varios autores indicando que estas estructuras se generan por la agrupación y superposición ordenada de nanoláminas, y su tamaño puede variar dependiendo de las condiciones de síntesis, tales como: temperatura, tiempo de reacción y tipo de precursores (Chatterjee et al., 2020; Flores Cardona, 2022; Sun et al., 2019). En cuanto a las morfologías de BiOI y BiOCl se observó que el BiOI presenta una distribución aleatoria de los nanopétalos, lo que da lugar a estructuras jerárquicas. Además, se observan poros superficiales que sugieren una mayor complejidad en la estructura. Por otro lado, el BiOCl muestra una distribución

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

más uniforme donde las nano-láminas se agrupan de forma regular y centrada. La morfología de estos oxihalogenuros de bismuto depende de varios parámetros de síntesis como son el tiempo de reacción, la temperatura máxima y el pH durante el proceso de formación (Mera Benavides, 2014). Tal como se observa en la Figura 12, las microfloreas no presentan uniformidad en su tamaño. La variación en el tamaño es explicado por Hao y colaboradores (2020) quienes sugieren que las microfloreas pueden presentar recubrimientos consistentes de varias capas, formándose a partir del centro de nucleación del mismo material, lo que da lugar a variaciones en la morfología y tamaño (Hao et al., 2020).

En la Figura 13, se presentan las imágenes obtenidas para el GO y los compósitos de los materiales. La Figura 15-A, el GO muestra estructuras laminares planas y delgadas, características típicas de este material (Instituto Nacional de Seguridad y salud en el Trabajo (INSST), 2015). Para los compósitos BiOI/GO, las Figuras 13 – C y D muestran los nanopétalos del BiOI sobre la superficie de las láminas de GO. No se observó una diferencia entre el diámetro de los nanopétalos; sin embargo, se percibe un cambio en la morfología, no se distinguen las microfloreas ordenadas del material prístino, este cambio aparente es debido a que la adición de grafeno ajustó el autoensamblaje de los nanopétalos, y se distribuyen en ambos lados de las láminas de GO (Gao et al., 2012). De manera similar, para los materiales de BiOCl/GO (Figura 13 – E y F) únicamente se presentó una agrupación de las nano-láminas en las estructuras de la microflor en la superficie del GO.

El análisis EDS confirma la presencia de todos los componentes en los materiales sintetizados. Las Figura 14-A muestra el análisis para BiOI donde se anexa el mapeo elemental y el porcentaje atómico encontrado 58.3% de oxígeno, 33.4% de bismuto y 8.3% de yodo, esto indica una alta concentración de oxígeno, la cual puede atribuirse a varias estructuras de bismuto incluyendo Bi_2O_3 , BiOI, $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ o algunas otras una estructura jerárquica (J. Liu et al., 2021; Niyati et al., 2020; Y. Zhang et al., 2017). Por otro lado, la Figura 14 – B muestra el análisis para BiOCl donde se encontró el 41.3% de oxígeno, 30.6% de cloro y 28.1% de bismuto, correspondiente a la estructura BiOCl.

En la Figura 15 se presenta el análisis de los compósitos BiOI/GO y BiOCl/GO, respectivamente. El BiOI/GO se presenta en la Figura 15-A en las cuales se

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

expone la presencia de carbono y el porcentaje en peso. Se realizó el cálculo del porcentaje atómico el cual se reporta en la Tabla 6, correspondiente a 16.5% de bismuto, 24.3% de oxígeno, 7.4% de yodo y 51.7% de carbono. El compuesto contiene un alto porcentaje de carbono lo que indica que el GO se encuentra en mayor proporción, respecto a las NPs de BiOI. Por otro lado, la Figura 15-B muestra el análisis para el compuesto BiOCl/GO con un porcentaje atómico de bismuto a 16.0%, oxígeno 20.1%, cloro 13.1% y carbono 50.8%. La posible ruta de formación del BiOX se explica por las condiciones de síntesis como pH, temperatura de calentamiento y tiempo de reacción, Lee y colaboradores explican las estructuras jerárquicas que se pueden obtener debido a diversas condiciones de síntesis (Lee et al., 2015). Del mismo modo Wang y colaboradores explican que el contenido de bismuto en los BiOX representa un rol muy importante en la actividad fotocatalítica (J. Wang et al., 2020) Por último, la Figura 16 muestra los análisis para los compósitos AgI/BiOI/GO y AgCl/BiOCl/GO. La Figura 16-A confirma la incorporación del yoduro de plata y la Figura 16-B confirma la presencia de cloruro de plata.

8.3.2. Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)

Con el propósito de obtener información sobre la morfología y cristalinidad de las muestras se analizaron mediante TEM y HRTEM. La Figura 17 muestra las micrográficas para BiOI. En ellas se confirma lo reportado previamente en el análisis SEM. Las Figuras 17-A y B, muestran que se ordenan hacia una matriz radial desde el centro hasta la superficie de la microestructura, en la Figura 17-C, se puede distinguir la diferencia de contraste entre el borde y la parte interior de la microflor lo que algunos autores mencionan que es debido a la naturaleza hueca de la estructura hacia la superficie. (Chatterjee et al., 2020). Del mismo modo se pueden apreciar las distancias reticulares por la estructura concuerdan con los valores reportados por otros autores, 0.36 nm y 0.28 nm que coinciden con los planos (1 1 0) y (1 0 2), respectivamente (Figura 17 F) (Z. Li et al., 2020). Por último, la Figura 17-I muestra el patrón de difracción de área seleccionada (SADP) que coincide con los planos (1 1 0), (1 0 2) y (2 1 2), los cuales también coinciden con el patrón de difracción de BiOI prístino (Dai et al., 2023; Sasikala et al., 2023).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Las micrografías HRTEM obtenidas para el compósito BiOI/GO se reportan con el fin de observar cambios o alteraciones que pueda experimentar el BiOI, además de estudiar cómo se incorporan las estructuras. La Figura 18–A, B y C muestra los análisis obtenidos de TEM para el compósito. Se puede observar que se perdió la microflor del material prístino, lo cual se debe a que los pétalos de BiOI se conjuntan de forma regular sobre la superficie de GO, algunos autores lo reportan como morfología laminar (Zhong et al., 2019). Las distancias reticulares para BiOI calculadas, confirman que es consistente con lo encontrado en el material prístino con un patrón de difracción (1 0 1). Algunas estructuras del compósito se pueden observar en las Figuras 18 G y H. Por último, el análisis de dirección de área seleccionada se muestra en la Figura 18 – I donde se pudo determinar que el patrón coincide con los planos (1 1 0), (1 0 2) y (2 1 2) (Yu et al., 2021).

Las estructuras de BiOCl también se estudiaron mediante TEM y HRTEM, se muestran en la Figura 19. Las Figuras 19–A, B y C muestran las arquitecturas irregulares similares a las flores de BiOCl, lo que es consistente con lo observado en SEM, además de que los nanopétalos coinciden con tamaños de 23 ± 5 nm y las esferas en 0.8 ± 0.2 μ m reportados por Zhao y colaboradores (2018). Las Figuras 19–D, E y F muestran los HRTEM de las distancias reticulares claras lo que indica la buena cristalinidad y la naturaleza monocristalina (Q. Zhao et al., 2018), las distancias promedio se encuentran en 0.27 nm y 0.34 que coinciden con los planos (1 1 0) y (1 0 1), respectivamente, reportado por otros autores (W. Kong et al., 2023; J. Liu et al., 2021). Por último, en el patrón de difracción de área seleccionada se lograron calcular los planos (1 0 1), (1 1 0) y (2 0 0) (Arumugam et al., 2021).

Las micrografías obtenidas para BiOCl/GO se muestran en la Figura–20 donde se distinguen las estructuras del óxido de grafeno recubiertas por BiOCl, algunos autores reportan que las NPs de BiOCl pueden estar densamente unidas a ambos lados de las láminas de GO, indicando interacciones químicas con las láminas de GO subyacentes (Gao et al., 2012). Estas interacciones pueden ser fuerzas de Van der Waals por la estructura plana y extendida de GO, atracciones electrostáticas por la naturaleza de las cargas de los componentes de GO y transferencia de electrones por las propiedades del GO y el BiOCl.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

A mayores aumentos (Figuras 20–D a G), se pueden observar los cambios en la morfología de las nanoesferas. Las mediciones de espacio reticular son 0.25 nm y 0.35 nm que corresponden a los planos (0 0 2) y (1 0 1) del BiOCl. Por último, las mediciones SADP confirmaron la presencia de los planos (0 0 2), (1 0 1) y (1 1 0), (Figura 20–I).

La Figura 21 muestra las micrografías para AgI/BiOI/GO. La Figura 21-A muestra estructuras laminares aglomeradas, que podrían corresponder a los nanopétalos del BiOI, no se distingue claramente la estructura de microflor, la Figura 21-B y C muestran estructuras laminares más delgadas que podrían corresponder al GO. Las Figuras 21-D, E y F revelan detalles más finos sobre las nanoestructuras, donde se observan aglomerados de partículas que indican los compósitos donde se calcula las distancias interplanares de 0.27 nm (Zhong et al., 2019). La Figura 21-G y D muestra la textura superficial de los nanopétalos de BiOI, se muestran placas acompañadas de partículas esféricas pequeñas de AgI en la superficie, lo que coincide con lo ya reportado anteriormente (Pourshirband et al., 2020).

Por último, la Figura 22 presenta las micrografías obtenidas para AgCl/BiOCl/GO. Para este caso, la estructura de microflor si se mantiene compuesta por nanopétalos entrelazados (Figura 22-A, B y C). En La Figura 22-G y H se distingue que se depositó AgCl granular sobre la superficie de BiOCl que tienen forma de lámina. En la Figura 22-F se observaron espaciamentos reticulares de 0,35 nm y 0,30 nm, que correspondían al plano (101) de BiOCl y al plano (111) de AgCl, respectivamente, lo que según Fu y colaboradores (2024) demuestra que se logró la construcción del compósito de AgCl/BiOCl (Fu et al., 2024)

8.3.3. Microscopia de fuerza atómica (AFM)

Las micrografías obtenidas en la caracterización por AFM se muestran en la Figura 23. En estas se observan las alturas correspondientes a cada material. En el proceso de preparación de las muestras de películas delgadas para observar en AFM se utiliza GA (5%) por lo que también se realizó el análisis AFM de una muestra de este material. Las películas de GA son muy pequeñas y delgadas cercanas a 4 nm, en las Figuras 23-A y D se observan distribuidas de

manera uniforme, con una estructura regular y específica, igual que lo reportado en un estudio previo del grupo de trabajo (Martínez-Montelongo et al., 2021). En comparación con las micrográficas de los materiales, el BiOI en la Figura 23–B se muestran cúmulos nanométricos de esferas unidas donde se pueden apreciar nano-láminas entrelazadas formando cada esfera en el material. Además, con la imagen 3D en la Figura 23–E se puede apreciar que el cúmulo alcanza alturas de 67 nm, se pueden apreciar las microfloreas que se puede reafirmar con las imágenes obtenidas por SEM (J. Bai et al., 2020; Chatterjee et al., 2020; Hao et al., 2020). Para el caso de BiOCl también se reportan estructuras de microflor pero en el caso del análisis AFM muestra estructuras mucho más pequeñas donde no se aprecian claramente las nano-láminas, los cúmulos formados presentan alturas de hasta 12 nm (Figura 23–C), En el estudio de Sun y colaboradores, encontró estructuras de nano-placas lamelares irregulares para BiOCl con una superficie lisa (Sun et al., 2019), lo que podría explicar el tamaño de cúmulos más pequeños.

Para el caso de los compósitos con GO se confirmaron los resultados presentados por SEM donde las nano-láminas adquieren una morfología distinta por la presencia de GO.

8.3.4. Análisis Infrarrojo (FT-IR)

El análisis FT-IR se estudió con el fin de determinar la naturaleza y pureza del material mediante sus grupos funcionales, un problema detectado fue la presencia de enlaces C-C que podrían ser derivados de etilenglicol utilizado en la síntesis, por lo que se realizaron lavados con acetona y alcohol para eliminar completamente los residuos. La Figura 24–A muestra los resultados para BiOI, en este se logran distinguir señales en 763, 875 y 1284 cm^{-1} que se deben a los estiramientos de enlaces de I – O (Sasikala et al., 2023). Las bandas de absorción localizadas en la región 400 a 700 se asocian a vibraciones de Bi – O, Bi – O – I y Bi – O – Bi. (Comak et al., 2024; Lee et al., 2015; Sasikala et al., 2023). En la Figura 24–B se muestra el análisis FT-IR para BiOI/GO donde se distinguen señales similares a BiOI puro pero se detecta la señal en 1720 cm^{-1} que se asocia el grupo carboxilo (Kamakshi et al., 2023).

En el caso de BiOCl en el FT-IR (Figura 24–C) se observan señales en torno a 3500 y 1600 cm^{-1} , que se atribuyen a un estiramiento de -OH (Mera et al., 2020). El BiOCl puro presenta señales de absorción característicos en las zonas de $1000 - 1100\text{ cm}^{-1}$ y $1600 - 1700\text{ cm}^{-1}$ que se asocian al estiramiento de Bi – O y Cl – O (Ji et al., 2020), señales que también pueden ser detectadas en el BiOCl/GO (Figura 24–D). La señal encontrada en 875 cm^{-1} se presenta como enlace Bi – Cl (H. Li et al., 2024). Algunas señales de absorción que se muestran 1415 a 1750 cm^{-1} pueden ser debidas a vibraciones de estiramiento entre C – OH y C = O, estas señales pueden ser detectadas con la incorporación de grafeno (Zhong et al., 2019).

Del mismo modo se realizó el análisis para AgI/BiOI/GO y el GO puro, los resultados se reportan en la Figura 24–E y Figura 24–F, respectivamente. En el caso del compuesto, se observan señales de absorción alrededor de 500 cm^{-1} que son vibraciones de estiramiento O – Bi, pero según autores, esta señal también puede atribuirse a la vibración de estiramiento de los enlaces Ag – X (X=Cl ó I), además la banda de absorción aguda alrededor de 2350 cm^{-1} se puede atribuir a la conjugación entre AgX y BiOX (Lourghi et al., 2024; Padervand et al., 2019).

8.3.5. Difracción de rayos X (DRX)

La técnica DRX permitió identificar y caracterizar las estructuras de naturaleza cristalina de los materiales de BIOX. En el caso de BiOI y BiOI/GO (Figura 25) se encontraron más de una fase cristalina. Una de ellas presentó similitud con la estructura cristalina de fase tetragonal de BiOI, lo cual coincide con lo reportado en otras investigaciones (He et al., 2016; Niyati et al., 2020; Y. Zhang et al., 2018; Zhong et al., 2019). La segunda fase coincide con la fase cristalina monoclinica de $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$. Se ha reportado que el método solvotermal y el uso de etilenglicol ayudan a crear microesferas de $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$ con vacantes de oxígeno (Lee et al., 2015), lo que puede atribuirse al exceso de oxígeno y bismuto en la red de BiOI, causando su expansión y distorsión estructural (Q. C. Liu et al., 2013).

El BiOCl y BiOCl/GO (Figura 25 – B) corresponden a la fase cristalina tetragonal con un 100% de coincidencia. Esta estructura se caracteriza por la disposición de capas de Bi-O-Bi-Cl apiladas a lo largo del eje, lo que le confiere propiedades

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

únicas (Mansor et al., 2021; Puttaraju et al., 2022). Además, se encontró que el plano cristalino de máxima intensidad es el (1 1 0) el cual puede estar relacionado con la presencia de vacancias de oxígeno en este plano (Zou et al., 2021).

El tamaño promedio del cristal fue calculado con la ecuación de Debye – Scherrer donde se calculó que BiOI tiene un tamaño de 35 nm y BiOCl un tamaño de 37 nm. Contreras *et al*, realizaron la síntesis de BiOI probando distintas condiciones de reacción, en donde principalmente variaron el pH y observaron que el tamaño del cristal puede variar, reportan tamaños promedio que van desde 23.26 hasta 31.31, sin embargo, no reportan una tendencia directa en relación al pH (Contreras et al., 2019).

8.3.6. Espectroscopía de Reflectancia Difusa de UV-Vis (UV-DRS)

La determinación de las propiedades ópticas de los materiales se realizó usando la técnica de UV-DRS. Los espectros obtenidos fueron tratados por Kubelka Munk y reportados en TAUC-Plot para el BiOI (Figura 26-A) y BiOCl (Figura 26-B) con el fin de encontrar el band gap de cada uno de los materiales.

En la Tabla 8 se reportan los valores de *Band gap* determinados. Para el BiOI se calculó un ancho de banda de 1.8 eV el cual coincide con lo reportado por varios autores quienes además reportan que el valor de *Band gap* está relacionado con la coloración de los polvos obtenidos el cual puede variar desde 1.83 eV, para las estructuras de coloración rojo, hasta 2.17 eV para los polvos amarillos (Lee et al., 2015; Sun et al., 2019; Y. Zhang et al., 2018; L. Zhu et al., 2012).

En el caso del BiOCl el *Band gap* se encontró en 3.4 eV que está dentro del rango que reportan otros autores el cual va desde 3.25 eV hasta 3.5 eV (Z. Li et al., 2020; Mansor et al., 2021).

Para los compósitos con GO en los dos materiales se presentó una disminución en el *Band gap* de 0.4 eV, He y colaboradores (2015) mencionan que la presencia de GO no cambia el borde de absorción, es decir, el rango de longitudes de onda de luz que el material puede absorber. Sin embargo, el GO intensifica la capacidad de adsorción de luz sea, lo que significa que el material absorbe luz de manera más eficiente. Esta mayor absorción se atribuye al color negro del GO, que típicamente absorbe más luz en comparación con materiales

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

de colores más claros (He et al., 2015; Tene et al., 2023). El grafeno puede actuar como un excelente material aceptor/transportador de electrones y más importante aún, la combinación de semiconductores y grafeno puede ser un sistema ideal para acelerar la carga (D. Chen et al., 2015).

8.3.7. Análisis de área superficial S_{BET}

Las curvas de las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno para BiOI, BiOI/GO, BiOCl, BiOCl/GO se muestran en la Figura 27 e indican que el comportamiento de los materiales se aproxima a las curvas de histéresis Tipo IV correspondientes a materiales mesoporosos, incluyendo un ciclo de histéresis H3, a alta presión relativa que oscila entre 0,4 y 1,0 (P/P_0) indicando partículas en forma de placa que dan lugar a poros en forma de hendidura abierta (Mera Benavides, 2014).

También se encuentran las curvas de distribución del tamaño de poro (recuadros de la Figura 26). Las curvas en todos los casos son amplias y se presentan tamaños muy variados con diámetros de 4 a 40 nm. La distribución de tamaños podría ser debido a la existencia de pequeños mesoporos, que son causados por la intra – agregación de cristales de BiOI dentro de las microfloreas (He et al., 2015).

El área superficial S_{BET} , el volumen de poro y el diámetro promedio de poro se reportan en la Tabla 9. Donde se observa que las propiedades pueden variar con la presencia del GO. Para BiOI se presenta un área superficial de 29 m^2/g mientras que el autor de la síntesis reporta 61 m^2/g (He et al., 2016), de igual manera los parámetros de volumen de poro y diámetro de poro son menores en el material.

Se puede observar que los resultados indican que la introducción de GO afectó los parámetros de textura, existe una disminución del área para el caso de BiOI y un aumentó para el caso de BiOCl. La estructura que los materiales presentan de microflor compuesta por nano-láminas podría tener buena cantidad de sitios activos para la reacción fotocatalítica aumentando la eficiencia de desinfección (Lee et al., 2015).

Por otro lado, según lo reportado en la bibliografía la superficie específica teórica del grafeno puede alcanzar los 2630 m^2/g (Pareek et al., 2019), por lo que se

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

puede deducir que es un buen candidato como un material de soporte en la aplicación de este proyecto mejorando la actividad de adsorción (Gadipelli & Guo, 2015).

8.3.8. Análisis electroquímico

El análisis electroquímico para conocer las propiedades electroquímicas y obtener más información sobre el material se presenta en la Figura 28. Se analizó cada material por separado en ausencia y en presencia de luz. Se puede apreciar que los voltamperogramas presentan mayores intensidades de corriente al ser irradiados con luz, lo que sugiere que tiene una mejor capacidad REDOX y por lo tanto presenta una mayor velocidad de transferencia de electrones (Ling-Li et al., 2012). De igual manera se reporta que los picos no se distinguen con claridad en los materiales con el GO indicando que posiblemente las reacciones REDOX se llevan a cabo con mayor velocidad.

Los picos de oxidación reducción demuestran que existen dos transferencias electrónicas diferentes entre los dos materiales analizados de BiOI que pueden presentar dos reacciones redox; mientras que BiOCl solo presenta una reacción redox.

8.4. Evaluación de la actividad antibacteriana

La prueba de actividad antimicrobiana para los materiales BiOX y BiOX/GO (X = Cl ó I), mostró las concentraciones inhibitorias y bactericidas para *S. aureus*. Se realizó una primera prueba para encontrar una posible concentración de inhibición con los materiales prístinos, tomando muestras cada hora durante 5 h. La Figura 29–A muestra los resultados para BiOI donde se observa que la concentración más alta es la que presenta un efecto inhibitorio a las 5 h de interacción. Algunos estudios realizados en otros grupos de investigación reportan que BiOI es poco efectivo, sin embargo, este material presenta buena actividad cuando se sintetizan diversos compósitos. Liang y colaboradores (2015), realizaron estudios con BiOI-Agl, donde determinaron que los fotocatalizadores de BiOI son funcionales en concentraciones de 100 µg/mL solamente en forma de compósito, ya que por sí solo no presentó efecto inhibitorio frente a *S. aureus*. El proceso de inactivación se realizó bajo la

irradiación de luz visible por 30 min (Liang et al., 2015). Zhu y colaboradores, también realizaron una comparación entre BiOI con Ag/BiOI frente a *E. coli*, utilizando concentraciones de 0.5 mg/mL con irradiación de luz visible y una hora de interacción probando nuevamente que la inactivación completa de la cepa bacteriana solamente se muestra al aumentar la concentración de plata (L. Zhu et al., 2012).

Para el caso de BiOCl, los resultados de la prueba preliminar observados en la Figura 29–B, muestran una inhibición usando las concentraciones de 20 y 60 µg/mL a las 4 y 2 h de interacción bajo luz visible, respectivamente. Otros estudios muestran que la concentración mínima inhibitoria de *S. aureus* es 32 µg/mL (Puttaraju et al., 2022), al igual que BiOI, existen reportes que evidencian que su eficiencia aumenta cuando se encuentra en forma de compuesto, o aumenta la concentración de algún dopante (J. Liu et al., 2021).

La CMI y CMB dependen del tiempo de interacción, la concentración de los nanomateriales y la fuente de luz irradiada para activar el fotocatalizador. Los resultados preliminares variaron en tiempo y concentración, es por ello que el experimento se realizó utilizando la técnica de dilución de UFC para determinar la CMI y CMB, realizando una primera modificación únicamente en las concentraciones variando de 25 hasta 500 µg/mL. Los resultados se muestran en la Figura 30. Al observar el control PBS y el control GA muestra un aumento de la densidad microbiana de $\sim 1.5 \times 10^4$ UFC/mL hasta $\sim 2.5 \times 10^4$ UFC/mL, recordado que la GA es utilizada para dispersar los materiales debido a que es comúnmente utilizado como agente estabilizante, al estar presente en una concentración tan baja y haber recibido un tratamiento térmico de esterilización, es posible que el polisacárido se haya simplificado y se volviera biodisponible para ser utilizado como fuente de carbono (Medina-Ramírez et al., 2022). Concretamente *S. aureus* depende de la capacidad enzimática específica de la cepa para metabolizar los polisacáridos presentes en la GA, además de estar influenciado por las condiciones ambientales, como el pH y la disponibilidad de otros nutrientes (Tang et al., 2024).

Dicho lo anterior se procede a explicar el comportamiento de las interacciones de los nanomateriales comparándolas contra el control GA, ya que todos los experimentos contienen GA.

Se confirman las concentraciones de inhibición de los materiales prístinos de la prueba preliminar. En la Figura 30 se puede observar que a las 5 h de interacción los materiales tienen una relación directamente proporcional al aumento de concentración hasta una concentración de 250 $\mu\text{g/mL}$. A concentraciones superiores a 250 $\mu\text{g/mL}$ se presentó el efecto contrario mostrando un aparente aumento en la viabilidad microbiana, esto se puede explicar por la posible aglomeración de los NPs que presentan las NPs en solución acuosa a altas concentraciones que consecuentemente disminuye o anula el efecto de inhibición de los materiales (Endres et al., 2021; Puttaraju et al., 2022). Sin embargo, nuevamente no se logró determinar la CMB para las condiciones empleadas en ninguno de los materiales.

Al comparar los materiales prístinos BiOX contra los compuesto BiOX/GO se puede apreciar que existe un aumento en las propiedades de inhibición reduciendo la CMI para disminuir la densidad microbiana a 25 $\mu\text{g/mL}$ (Figura 30). Otros estudios mencionan que el GO puede actuar como aceptor de electrones y evitar la recombinación del par electrón-hueco, estos electrones pueden ser transferidos al oxígeno, incrementando la generación de especies reactivas de oxígeno (K. Li et al., 2018). Se ha reportado por varios grupos de investigación la consecuencia del aumento de actividad gracias al efecto sinérgico de las partículas de bismuto y el grafeno, además de que los electrones excitados de la resonancia plasmónica superficial del metal contribuyen a la generación de especies reactivas de oxígeno, indispensables para la inhibición del microorganismo (Ekthammathat et al., 2018; Liang et al., 2015; Padervand et al., 2019; M. Zhao et al., 2019).

En la Figura 31 se muestra un segundo experimento donde se realizó la modificación el tiempo de interacción, variando de 5 a 8 h. En los resultados se observa que se logró mantener la densidad microbiana en el control GA, partiendo de que el tratamiento térmico y por las condiciones no estuvo biodisponible para el microorganismo. Por otro lado, se encontraron concentraciones muy cercanas a la CMB.

Varios estudios se han realizado para tratar de dilucidar los mecanismos de desinfección, entre los propuestos se encuentra la interrupción en la membrana o pared celular (A), la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), el

transporte al núcleo (B), daño a proteínas y al ADN (C), daño a diversos componentes intracelulares (D), escape de moléculas, degradación y muerte celular, entre otras (Bono et al., 2021; Liang et al., 2015) (Figura 42).

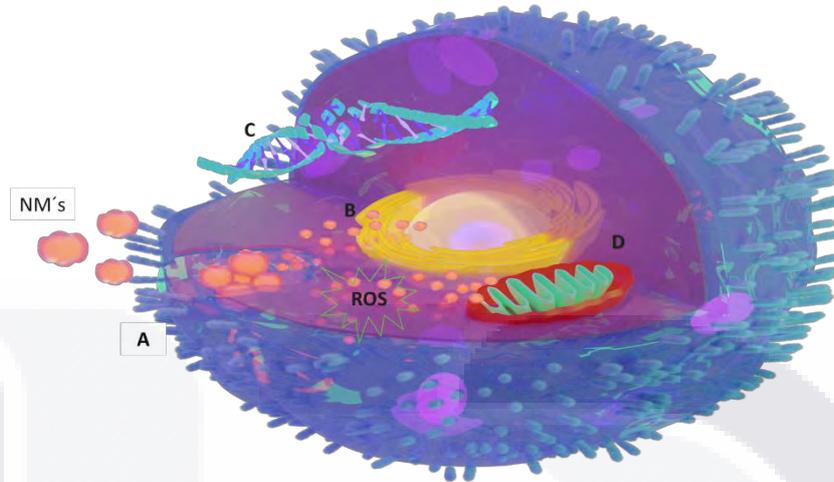


Figura 42. Representación de los posibles mecanismos de desinfección fotocatalítica por BiOX

8.5. Evaluación de la toxicidad

Debido a la aplicación principal de las NPs BiOX y BiOX/GO, se realizó el ensayo de viabilidad para determinar el posible efecto tóxico de los materiales utilizando la línea celular de epitelio pulmonar humano A549 como modelo biológico. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 33. Se puede observar la respuesta de A549 a diferentes concentraciones de NPs.

El BiOI presentó efecto tóxico estadísticamente significativo a partir de los 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ en un 30% y continúa aumentando en relación con el aumento de la dosis, mientras que se puede observar una liberación de LDH al medio igualmente proporcional al aumento de la concentración de las NPs.

Por otro lado, el compuesto de BiOI/GO presentó una mejor respuesta en el ensayo, debido a que la pérdida de viabilidad significativa comenzó en 90 $\mu\text{g}/\text{mL}$, permaneciendo cercana al 30%. Este resultado sugiere que el GO aumenta la biocompatibilidad del material fotocatalítico a las concentraciones de exposición frente a las células A549. Algunas investigaciones muestran que viabilidad celular del GO en las células A549 presentan una relativamente baja toxicidad utilizando concentraciones de 1 a 20 $\mu\text{g}/\text{ml}$ en 48 h de exposición (Liao et al., 2021).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Para el caso de BiOCl prístino no presentó una pérdida significativa de viabilidad (Figura 33) ni un daño significativo según los datos LDH. El BiOCl/GO si mostró una disminución en la viabilidad a partir de 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ incluyendo liberación de LDH al medio. Este resultado sugiere que la viabilidad celular va acompañada de daño en la membrana celular y posiblemente un daño oxidativo.

Es importante discutir que los ensayos CCK-8 son técnicas colorimétricas y por lo tanto son propensas a interferencias debido a la lixiviación de iones coloreados, o incluso la coloración del GO (Alkilany et al., 2016; Jiao et al., 2015). Los compuestos a base de bismuto son muy utilizados con diversas aplicaciones, debido a su bien conocida biocompatibilidad, estos compuestos tienen aplicaciones médicas diversas, para tratar trastornos gastrointestinales, hipertensión y sífilis (Shahbazi et al., 2020). Este estudio pretende demostrar la bioseguridad del uso del filtro en ambientes cerrados por una posible liberación accidental de estos materiales, por lo que, según los resultados analizados, una liberación accidental de estos materiales no representa un peligro para la salud humana, ya que los NM ejercen citotoxicidad en dosis superiores a 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$.

8.6. Pruebas de desinfección de aire

En este trabajo se evaluaron los materiales soportados en perlita en un primer prototipo de filtro de aire en clínicas de estomatología. Para determinar la eficiencia del filtro se tomaron muestras sin utilizar el filtro para determinar la carga microbiana total del ambiente en la clínica, posteriormente se colocó el filtro y se realizó el muestreo con las mismas condiciones. En la Figura 34 se muestra la toma de muestra con un impactador de cascada de Andersen de 6 niveles, con una bomba de succión de 28.3 L/min (Moctezuma Zárate et al., 2015).

Los resultados obtenidos mostraron una densidad bacteriana superior a 1000 UFC/ m^3 , mientras que con el uso de los filtros se logró una eficiencia de desinfección para el BiOI de 95%, para el BiOI/GO de 96%, para el BiOCl de 75% y para el BiOCl/GO de 97% (Figura 36). En la Figura 35 se muestra las imágenes de las bacterias implicadas en cada uno de los niveles del impactador con todos los filtros de aire, en esta se puede apreciar la menor cantidad de

microorganismos cuando se utiliza el filtro de los compósitos BiOX/GO, siendo los mejores candidatos para el diseño modelo de reactor fotocatalítico.

Con el impactador de cascada de Andersen de 6 niveles, es posible clasificar las bacterias respirables de las no respirables, las cuales son consideradas, de acuerdo al nivel en que fueron impactadas por el tamaño de poro, los microorganismos con diámetros de 1.18 a 0.254 mm. Para el muestreo se encontró una elevada cantidad entre los niveles 4, 5 y 6, indicando que son tan pequeñas que pueden ingresar por las vías respiratorias y causar enfermedades importantes.

No existe regulación en México sobre la cantidad máxima de UFC en espacios interiores ni en espacios hospitalarios pero la OMS ha recomendado que sean menores a 1000 UFC/m³. Algunos estudios han reportado cantidades elevadas de bacterias en el aire causantes de diversas enfermedades, por ejemplo, en hospitales se han encontrado más de 2000 UFC/m³ (Osman et al., 2018), en enfermerías más de 3000 UFC/m³ (Basińska et al., 2019), en clínicas dentales cantidades cercanas a 1000 UFC/m³ (Giri, 2020), entre otras investigaciones que reportan en diversas áreas de interiores (Babaoglu et al., 2020; Mirhoseini et al., 2020; Onklay et al., 2020).

8.7. Desinfección con los modelos diseñados.

Las pruebas de desinfección con los modelos terminados se realizaron en jornadas de trabajo laboral estándar de 8 h, se pusieron en operación en ciclos de desinfección y los resultados se presentan en la Figura 39. Los resultados sugieren que el diseño es efectivo para procesos de desinfección de interiores, los ciclos de desinfección aseguran ambientes limpios con una buena calidad de aire interior.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se lograron diseñar prototipos fotocatalíticos para la desinfección de aire de interiores para aplicar en el transporte público y para hospitales. Primeramente, se sintetizaron nanomateriales de oxihalogenuros de bismuto, BiOI y BiOCl, sus compósitos con el GO: BiOI/GO y BiOCl/GO) y sus compósitos con los halógenos de plata (AgI/BiOI/GO y AgCl/BiOCl/GO). Todos los materiales presentaron una buena apariencia, deseable y congruente con lo reportado en literatura, las características particulares de los materiales los hicieron candidatos para el tratamiento de aire.

Se han caracterizado las NMs mediante diversas técnicas microscópicas y espectrofotométricas. El análisis SEM, AFM, TEM y HRTEM revelaron la estructura de microflor y el tamaño nanométrico de los pétalos que conforman la microflor. Además de confirmar que se logró la síntesis de los compósitos de manera exitosa. El análisis DRX, UV-DRS, área superficial BET expusieron características de los materiales incluyendo propiedades ópticas y de superficie. La evaluación en desinfección mostró que BiOX/GO es más efectivo ya que presenta una actividad bajo luz visible mejorada. Los prototipos probados en ambientes reales lograron la eliminación (desinfección) mayor al 90% de microorganismos presentes en aire mostrando que son viables para la purificación de aire en futuros estudios.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, F., Jalili, M., Samaei, M. R., Mokhtari, A. M., & Azizi, E. (2019). The Monitoring of Fungal Contamination in Indoor Air of Two Hospitals in Shiraz. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 4(4), 879–884. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v4i4.2020>
- Aguirre Cedillo, F. Ja. (2019). *Estudio de fotocatalizadores nanoestructurados [SrAl₂O₄: LnX Y TiO₂] para la posible eliminación de Cr⁶⁺ en efluentes de tenería* [Centro de Investigaciones en optica]. <http://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/1122>
- Ahmadi, Y., Bhardwaj, N., Kim, K. H., & Kumar, S. (2021). Recent advances in photocatalytic removal of airborne pathogens in air. *Science of the Total Environment*, 794, 148477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148477>
- Alalm, M. G., Djellabi, R., Meroni, D., Pirola, C., Bianchi, C. L., & Boffito, D. C. (2021). Toward scaling-up photocatalytic process for multiphase environmental applications. *Catalysts*, 11(5), 1–23. <https://doi.org/10.3390/catal11050562>
- Alkilany, A. M., Mahmoud, N. N., Hashemi, F., Hajipour, M. J., Farvadi, F., & Mahmoudi, M. (2016). Misinterpretation in Nanotoxicology: A Personal Perspective. *Chemical Research in Toxicology*, 29(6), 943–948. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.6b00108>
- Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 14(April), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
- Arsuaga, J. (2019). *Z = 83, bismuto, Bi*. 115(2), 2019.
- Arumugam, M., Natarajan, T. S., Saelee, T., Praserthdam, S., Ashokkumar, M., & Praserthdam, P. (2021). Recent developments on bismuth oxyhalides (BiOX; X = Cl, Br, I) based ternary nanocomposite photocatalysts for environmental applications. *Chemosphere*, 282(March), 131054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131054>
- Asadi, S., Bouvier, N., Wexler, A. S., & Ristenpart, W. D. (2020). The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol Science and Technology*, 54(6), 635–638. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1749229>
- Babaoglu, U. T., Milletli Sezgin, F., & Yag, F. (2020). Sick building symptoms among hospital workers associated with indoor air quality and personal factors. *Indoor and Built Environment*, 29(5), 645–655. <https://doi.org/10.1177/1420326X19855117>
- Bai, J., Sun, J., Zhu, X., Liu, J., Zhang, H., Yin, X. B., & Liu, L. (2020). Enhancement of Solar-Driven Photocatalytic Activity of BiOI Nanosheets through Predominant Exposed High Energy Facets and Vacancy Engineering. *Small*, 16(5), 1–7. <https://doi.org/10.1002/sml.201904783>
- Bai, X., Cao, Y., Zhu, B., Liu, R., Dong, J., & Yang, H. (2024). *Enhancement of Photocatalytic Antimicrobial Performance via Generation and Diffusion of ROS*. 1–24.
- Barabadi, H., Jounaki, K., Pishgahzadeh, E., Morad, H., Sadeghian-Abadi, S., Vahidi, H., & Hussain, C. M. (2022). Antiviral potential of green-synthesized silver nanoparticles. *Handbook of Microbial Nanotechnology*, 285–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0->

12-823426-6.00030-9

- Bermejo, M. (2018). Fotocatalisis y su capacidad descontaminante. Aplicacion en gran vía. *Fotocatalizador*, 1, 47. <https://oa.upm.es/49612/%0A>
- Bhardwaj, S. K., Bhardwaj, N., Kumar, V., Bhatt, D., Azzouz, A., Bhaumik, J., Kim, K. H., & Deep, A. (2021). Recent progress in nanomaterial-based sensing of airborne viral and bacterial pathogens. *Environment International*, 146(April 2020), 106183. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106183>
- Bhardwaj, S. K., Singh, H., Deep, A., Khatri, M., Bhaumik, J., Kim, K. H., & Bhardwaj, N. (2021). UVC-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses. *Science of the Total Environment*, 792, 148548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148548>
- Bitew, K., Gidebo, D. D., & Ali, M. M. (2021). Bacterial contamination rates and drug susceptibility patterns of bacteria recovered from medical equipment, inanimate surfaces, and indoor air of a neonatal intensive care unit and pediatric ward at Hawassa University Comprehensive Specialized Hospital, . *IJID Regions*, 1(July), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijregi.2021.09.005>
- Bono, N., Ponti, F., Punta, C., & Candiani, G. (2021). Effect of UV irradiation and TiO₂-photocatalysis on airborne bacteria and viruses: An overview. *Materials*, 14(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma14051075>
- Bragoszewska, E., Bogacka, M., & Pikoń, K. (2019). Efficiency and Eco-Costs of Air Purifiers in Terms of Improving Microbiological Indoor Air Quality in Dwellings—A Case Study. *Atmosphere*, 10(12), 742. <https://doi.org/10.3390/atmos10120742>
- Büchner, F., Hoffman, M., Dobermann, U. H., Edel, B., Lehmann, T., & Kipp, F. (2021). Do closed waste containers lead to less air contamination than opened? A clinical case study at Jena University Hospital, Germany. *Waste Management*, 136(April), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.031>
- Budzynski, M., Luczkiewicz, A., & Szmaglini, J. (2021). Assessing the Risk in Urban Public Transport for Epidemiologic Factors. *Energies*, 14(15), 4513. <https://doi.org/10.3390/en14154513>
- Bui, V. K. H., Nguyen, T. N., Van Tran, V., Hur, J., Kim, I. T., Park, D., & Lee, Y. C. (2021). Photocatalytic materials for indoor air purification systems: An updated mini-review. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101471. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101471>
- Cabo Verde, S., Almeida, S. M., Matos, J., Guerreiro, D., Meneses, M., Faria, T., Botelho, D., Santos, M., & Viegas, C. (2015). Microbiological assessment of indoor air quality at different hospital sites. *Research in Microbiology*, 166(7), 557–563. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2015.03.004>
- Camfil. (2019). Conociendo Su Filtro Hepa. *Camfil*, 7–7. https://www.camfil.com/-/media/files/qbank/documents/_documents/brochures/spain-brochures/booklet-understanding-your-hepa-filter-es.pdf?rev=6ee9a213208049a3abdb1c0b8dcc0431&hash=646F5DBFDBEE17B23C92E8977173B512
- Cao, G., Pedersen, C., Zhang, Y., Drangsholt, F., Radtke, A., Langvatn, H., Stenstad, L. I.,

- Mathisen, H. M., & Skogås, J. G. (2022). Can clothing systems and human activity in operating rooms with mixed flow ventilation systems help achieve the ultraclean air requirement (≤ 10 CFU/m³) during orthopaedic surgeries? *Journal of Hospital Infection*, 120, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.11.005>
- Ceder, A. (Avi). (2021). Urban mobility and public transport: future perspectives and review. *International Journal of Urban Sciences*, 25(4), 455–479. <https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>
- Chatterjee, A., Kar, P., Wulferding, D., Lemmens, P., & Pal, S. K. (2020). Flower-Like BiOI Microspheres Decorated with Plasmonic Gold Nanoparticles for Dual Detoxification of Organic and Inorganic Water Pollutants. *ACS Applied Nano Materials*, 3(3), 2733–2744. <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c00090>
- Chen, C., Liao, C., Wongso, I., Wang, W., Khir, R., Ning, Z., Huang, G., Niederholze, F., Wang, L., & Pan, Z. (2021). Drying and disinfection of off-ground harvested almonds using step-down temperature hot air heating. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2021*, 2(August), 801–813. <https://doi.org/10.13031/aim.202100267>
- Chen, D., Feng, H., & Li, J. (2012). Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications. *Chemical Reviews*, 112(11), 6027–6053. <https://doi.org/10.1021/cr300115g>
- Chen, D., Wang, D., Ge, Q., Ping, G., Fan, M., Qin, L., Bai, L., Lv, C., & Shu, K. (2015). Graphene-wrapped ZnO nanospheres as a photocatalyst for high performance photocatalysis. *Thin Solid Films*, 574, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.051>
- Chen, M., Li, X., Huang, Y., Yao, J., Li, Y., Lee, S. cheng, Ho, W., Huang, T., & Chen, K. (2020). Synthesis and characterization of Bi-BiPO₄ nanocomposites as plasmonic photocatalysts for oxidative NO removal. *Applied Surface Science*, 513(January), 145775. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145775>
- Chen, Y. C., Liao, C. H., Shen, W. T., Su, C., Wu, Y. C., Tsai, M. hsuan, Hsiao, S. S., Yu, K. P., & Tseng, C. heng. (2019). Effective disinfection of airborne microbial contamination in hospital wards using a zero-valent nano-silver/TiO₂-chitosan composite. *Indoor Air*, 29(3), 439–449. <https://doi.org/10.1111/ina.12543>
- Comak, G., Bayram, G., Görmez, Ö., Çağlayan, U., & Gözmen, B. (2024). Synthesis of biomass-based BiOI@Hydrochar heterogeneous catalyst and investigation of its activity in sonocatalytic process. *Desalination and Water Treatment*, 320(July), 100625. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100625>
- Contreras, D., Melin, V., Márquez, K., Pérez-González, G., Mansilla, H. D., Pecchi, G., & Henríquez, A. (2019). Selective oxidation of cyclohexane to cyclohexanol by BiOI under visible light: Role of the ratio (1 1 0)/(0 0 1) facet. *Applied Catalysis B: Environmental*, 251(March), 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.058>
- Correa, M., Mera, S., Guacho, F., Villarreal, E., & Valencia, S. (2020). Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia preventiva ante la COVID-19. *Minerva*, 1(2), 46–53. <https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.11>
- Czodörová, R., Dockalik, M., & Gnap, J. (2021). Impact of COVID-19 on bus and urban public transport in SR. *Transportation Research Procedia*, 55(2019), 418–425.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.005>

- Dai, D., Qiu, J., Xia, G., Zhang, L., Ma, H., Yang, L., & Yao, J. (2023). Interspersing CdS nanodots into iodine vacancy-rich BiOI sphere for photocatalytic lignin valorization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 227(November 2022), 1317–1324. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.007>
- De Robles, D., & Kramer, S. W. (2017). Improving Indoor Air Quality through the Use of Ultraviolet Technology in Commercial Buildings. *Procedia Engineering*, 196(June), 888–894. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.021>
- Delsouz Khaki, M. R., Shafeeyan, M. S., Raman, A. A. A., & Daud, W. M. A. W. (2018). Evaluating the efficiency of nano-sized Cu doped TiO₂/ZnO photocatalyst under visible light irradiation. *Journal of Molecular Liquids*, 258, 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.030>
- DOF, D. O. de la F. (2019). *NMX-C-7730.pdf* (p. 4). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5564192&fecha=26/06/2019#gs.c.tab=0
- Dolez, P. I. (2015). Nanomaterials Definitions, Classifications, and Applications. In *Nanoengineering: Global Approaches to Health and Safety Issues*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62747-6.00001-4>
- Dong, F., Xiong, T., Sun, Y., Zhao, Z., Zhou, Y., Feng, X., & Wu, Z. (2014a). A semimetal bismuth element as a direct plasmonic photocatalyst. *Chemical Communications*, 50(72), 10386–10389. <https://doi.org/10.1039/c4cc02724h>
- Dong, F., Xiong, T., Sun, Y., Zhao, Z., Zhou, Y., Feng, X., & Wu, Z. (2014b). A semimetal bismuth element as a direct plasmonic photocatalyst. *Chemical Communications*, 50(72), 10386–10389. <https://doi.org/10.1039/c4cc02724h>
- Dong, X., Xu, L., Ma, J., Li, Y., Yin, Z., Chen, D., Wang, Q., Han, J., Qiu, J., Yang, Z., & Song, Z. (2023). Enhanced interfacial charge transfer and photothermal effect via in-situ construction of atom co-sharing Bi plasmonic/Bi₄O₅Br₂ nanosheet heterojunction towards improved full-spectrum photocatalysis. *Chemical Engineering Journal*, 459(November 2022), 141557. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141557>
- Ekthammathat, N., Pornharuthai, P., & Phuruangrat, A. (2018). Microwave Irradiation Synthesis and Characterization of Silver Doped Bismuth Oxyiodide Microflowers with Enhanced Daylight Photocatalytic Performance. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 6(3), 238–242. <https://doi.org/10.18178/ijmmm.2018.6.3.383>
- Encarnación Ambriz, C. E. (2014). *Tratamiento de efluentes hospitalarios mediante fotocatalisis heterogénea y luz visible*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/123456789/256>
- Endres, S. C., Ciacchi, L. C., & Mädler, L. (2021). A review of contact force models between nanoparticles in agglomerates, aggregates, and films. *Journal of Aerosol Science*, 153(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105719>
- Environmental Protection Agency EE. UU. (2019). *Purificadores de aire, un resumen técnico*. 3, 84. www.epa.gov/iaq
- EPA, E. P. A. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de

- flujo subsuperficial. *United States Environmental Protection Agency, (Us Epa).*, 64, 13. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-063.pdf>
- EPA, E. P. A. (2024). *Introduction to Indoor Air Quality*. Indoor Air Quality (IAQ). <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
- Escobedo, S., & Lasa, H. de. (2020). Photocatalysis for air treatment processes: Current technologies and future applications for the removal of organic pollutants and viruses. *Catalysts*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/catal10090966>
- Flores Cardona, C. (2022). *Síntesis de nanocompuestos basados en BiOI empleados en la adsorción y fotodegradación de compuestos orgánicos en solución acuosa*. 96.
- Forgione, M. (2022). Feynman's space-time view in quantum electrodynamics. *Studies in History and Philosophy of Science*, 93, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2022.03.006>
- Fu, S., Chu, Z., Huang, Z., Dong, X., Bie, J., Yang, Z., Zhu, H., Pu, W., Wu, W., & Liu, B. (2024). Construction of Z-scheme AgCl/BiOCl heterojunction with oxygen vacancies for improved pollutant degradation and bacterial inactivation. *RSC Advances*, 14(6), 3888–3899. <https://doi.org/10.1039/d3ra08514g>
- Gadipelli, S., & Guo, Z. X. (2015). Graphene-based materials: Synthesis and gas sorption, storage and separation. *Progress in Materials Science*, 69, 1–60. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.004>
- Gao, F., Zeng, D., Huang, Q., Tian, S., & Xie, C. (2012). Chemically bonded graphene/BiOCl nanocomposites as high-performance photocatalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(30), 10572–10578. <https://doi.org/10.1039/c2cp41045a>
- González, M. (2018). Química sostenible y fotocatalisis: nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para la síntesis de compuestos orgánicos. *Anales de Química*, 114(1), 31–38. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1049/1499>
- Graeffe, F., Luo, Y., Guo, Y., & Ehn, M. (2023). Unwanted Indoor Air Quality Effects from Using Ultraviolet C Lamps for Disinfection. *Environmental Science and Technology Letters*, 10(2), 172–178. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00807>
- Haghighatmamaghani, A., Haghighat, F., & Lee, C. S. (2019). Performance of various commercial TiO₂ in photocatalytic degradation of a mixture of indoor air pollutants: Effect of photocatalyst and operating parameters. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(5), 600–614. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1556051>
- Hao, L., Liu, T., Yan, J., Hu, Y., Jiang, F., Zhao, Q., Lu, Y., & Ping, X. (2020). Anodized BiOI coatings and their photocatalytic activity of organic dye degradation. *Surfaces and Interfaces*, 20(1038), 100562. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100562>
- Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., Niculescu, V. C., & El Nemr, A. (2023). Principles of Photocatalysts and Their Different Applications: A Review. In *Topics in Current Chemistry* (Vol. 381, Issue 6). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>
- He, R., Cao, S., Guo, D., Cheng, B., Wageh, S., Al-Ghamdi, A. A., & Yu, J. (2015). 3D BiOI-GO composite with enhanced photocatalytic performance for phenol degradation

- under visible-light. *Ceramics International*, 41(3), 3511–3517.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.003>
- He, R., Cao, S., Yu, J., & Yang, Y. (2016). Microwave-assisted solvothermal synthesis of Bi₄O₅I₂ hierarchical architectures with high photocatalytic performance. *Catalysis Today*, 264, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.07.029>
- He, R., Cao, S., Zhou, P., & Yu, J. (2014). Recent advances in visible light Bi-based photocatalysts. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 35(7), 989–1007. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(14\)60075-9](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(14)60075-9)
- Herrmann, J. M., & Puzenat, E. (2015). Green Process Engineering. In M. Poux, P. Cognet, & C. Gourdon (Eds.), *Green Process Engineering: From Concepts to Industrial Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18533>
- Ibrahim, F., Samsudin, E. Z., Ishak, A. R., & Sathasivam, J. (2022). Hospital indoor air quality and its relationships with building design, building operation, and occupant-related factors: A mini-review. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1067764>
- Instituto Nacional de Seguridad y salud en el Trabajo (INSST). (2015). Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales. *Blamey y Otros*, 2(2), 17–22. <http://publicacionesoficiales.boe.eshttp://www.insht.es/catalogopublicaciones/>
- ISO, I. S. (2017). Energy performance of buildings — Indoor environmental quality —. *ISO 17772-1: 2017. Energy Performance of Buildings*, 2017.
- Jawad, K. H., Marzog, T. R., Hasoon, B. A., Sulaiman, G. M., Jabir, M. S., Ahmed, E. M., & Khalil, K. A. A. (2022). Antibacterial Activity of Bismuth Oxide Nanoparticles Compared to Amikacin against *Acinetobacter baumannii* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Nanomaterials*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8511601>
- Ji, Q., Xu, Z., Xiang, W., Wu, Y., Cheng, X., Xu, C., Qi, C., He, H., Hu, J., Yang, S., Li, S., & Zhang, L. (2020). Enhancing the performance of pollution degradation through secondary self-assembled composite supramolecular heterojunction photocatalyst BiOCl/PDI under visible light irradiation. *Chemosphere*, 253, 126751. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126751>
- Jian, J., & Sun, J. (2020). A Review of Recent Progress on Silicon Carbide for Photoelectrochemical Water Splitting. *Solar RRL*, 4(7). <https://doi.org/10.1002/solr.202000111>
- Jiao, G., He, X., Li, X., Qiu, J., Xu, H., Zhang, N., & Liu, S. (2015). Limitations of MTT and CCK-8 assay for evaluation of graphene cytotoxicity. *RSC Advances*, 5(66), 53240–53244. <https://doi.org/10.1039/c5ra08958a>
- Jimenez-Relinque, E., Dappozze, F., Berhault, G., Gilbert, C., Leonard, D., & Guillard, C. (2024). Bismuth oxyhalide as efficient photocatalyst for water, air treatment and bacteria inactivation under UV and visible light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 452(February). <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115554>
- Kamakshi, P., Joshitha, C., Chella, S., & Selvaraj, S. (2023). Synthesis, characterization of BiOI/rGO nanocomposite and its photocatalytic functionality analysis under visible light. *Inorganic Chemistry Communications*, 150(November 2022), 110545.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110545>

- Karmakar, P., Pradhan, S., & Chakraborty, S. (2024). *Indoor Air Quality Dataset with Activities of Daily Living in Low to Middle-income Communities*. 1–23. <http://arxiv.org/abs/2407.14501>
- Kato, Y., Ono, L. K., Lee, M. V., Wang, S., Raga, S. R., & Qi, Y. (2015). Silver Iodide Formation in Methyl Ammonium Lead Iodide Perovskite Solar Cells with Silver Top Electrodes. *Advanced Materials Interfaces*, 2(13), 2–7. <https://doi.org/10.1002/admi.201500195>
- Kausar, M. A., Arif, J. M., Alanazi, S. M. M., Alshmmry, A. M. A., Alzapni, Y. A. A., Alanazy, F. K. B., Shahid, S. M. A., & Hossain, A. (2016). Assessment of microbial load in indoor environment of university and hospitals of hail, ksas. *Biochemical and Cellular Archives*, 16(1), 177–183.
- Kek, H. Y., Mohd Saupi, S. B., Tan, H., Dzarfan Othman, M. H., Nyakuma, B. B., Goh, P. S., Hamood Altowayti, W. A., Qaid, A., Abdul Wahab, N. H., Lee, C. H., Lubis, A., Wong, S. L., & Wong, K. Y. (2023). Ventilation strategies for mitigating airborne infection in healthcare facilities: A review and bibliometric analysis (1993–2022). *Energy and Buildings*, 295(March), 113323. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113323>
- Khader, E. H., Muslim, S. A., Saady, N. M. C., Ali, N. S., Salih, I. K., Mohammed, T. J., Albayati, T. M., & Zendejboudi, S. (2024). Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review. *Desalination and Water Treatment*, 318(March), 100384. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100384>
- Kim, C., Choi, D., Lee, Y. G., & Kim, K. (2021). Diagnosis of indoor air contaminants in a daycare center using a long-term monitoring. *Building and Environment*, 204, 108124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108124>
- Kim, D. K., & Kang, D. H. (2018). UVC LED irradiation effectively inactivates aerosolized viruses, bacteria, and fungi in a chamber-type air disinfection system. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(17), 1–33. <https://doi.org/10.1128/AEM.00944-18>
- Kim, J., & Jang, J. (2018). Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time. *Aerosol Science and Technology*, 52(5), 557–566. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1431386>
- Koller, L. R. (1939). Bactericidal effects of ultraviolet radiation produced by low pressure mercury vapor lamps. *Journal of Applied Physics*, 10(9), 624–630. <https://doi.org/10.1063/1.1707353>
- Kong, T., Liao, A., Xu, Y., Qiao, X., Zhang, H., Zhang, L., & Zhang, C. (2024). Recent advances and mechanism of plasmonic metal-semiconductor photocatalysis. *RSC Advances*, 14(24), 17041–17050. <https://doi.org/10.1039/d4ra02808b>
- Kong, W., Ge, X., Kong, D., Liu, C., Sun, J., Zhu, X., Zhang, M., & Feng, Y. (2023). Highly dispersed ultrasmall BiOCl nanoclusters on graphene sheets as high-performance anion-capture electrode for hybrid capacitive deionization. *The Lancet Pschch*, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.2139/ssrn.4576358>
- Kong, Y., Li, D., Zhang, C., Han, W., Xue, Y., Zhang, W., Sun, H., Wang, S., & Duan, X.

- (2024). Synergistic silver doping and N vacancy promoting photocatalytic performances of carbon nitride for pollutant oxidation and hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 479(November 2023), 147676. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147676>
- Kumar, P., Kausar, M. A., Singh, A. B., & Singh, R. (2021). Biological contaminants in the indoor air environment and their impacts on human health. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 14(11), 1723–1736. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00978-z>
- Kumar, P., Singh, A. B., Arora, T., Singh, S., & Singh, R. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Science of the Total Environment*, 872(November 2022), 162163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162163>
- Lee, W. W., Lu, C. S., Chuang, C. W., Chen, Y. J., Fu, J. Y., Siao, C. W., & Chen, C. C. (2015). Synthesis of bismuth oxyiodides and their composites: Characterization, photocatalytic activity, and degradation mechanisms. *RSC Advances*, 5(30), 23450–23463. <https://doi.org/10.1039/c4ra15072d>
- Lekshmi Mohan, V., Shiva Nagendra, S. M., & Maiya, M. P. (2019). Photocatalytic degradation of gaseous toluene using self-assembled air filter based on chitosan/activated carbon/TiO₂. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6), 103455. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103455>
- Leung, M., & Chan, A. H. S. (2006). Control and management of hospital indoor air quality. *Medical Science Monitor*, 12(3).
- Li, H., Gao, C., Yang, G., Xia, L., Jiang, W., Li, H., Gao, C., Yang, G., Xia, L., Jiang, W., Wu, C., & Wang, K. (2024). Enhanced photocatalytic CO₂ reduction of Bi₂WO₆-BiOCl heterostructure with coherent interface for charge utilization. *Chinese Chemical Letters*, 110547. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2024.110547>
- Li, K., Chen, P., Li, J., Sun, Y., Chu, Y., & Dong, F. (2018). Enhanced plasmonic photocatalytic disinfection on noble-metal-free bismuth nanospheres/graphene nanocomposites. *Catalysis Science and Technology*, 8(18), 4600–4603. <https://doi.org/10.1039/c8cy01386a>
- Li, R., Wang, X., & Chen, M. (2023). Non-Noble Metal and Nonmetallic Plasmonic Nanomaterials with Located Surface Plasmon Resonance Effects: Photocatalytic Performance and Applications. *Catalysts*, 13(6), 940. <https://doi.org/10.3390/catal13060940>
- Li, X., Sun, Y., Xiong, T., Jiang, G., Zhang, Y., Wu, Z., & Dong, F. (2017). Activation of amorphous bismuth oxide via plasmonic Bi metal for efficient visible-light photocatalysis. *Journal of Catalysis*, 352, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.04.025>
- Li, Z., Huang, G., Liu, K., Tang, X., Peng, Q., Huang, J., Ao, M., & Zhang, G. (2020). Hierarchical BiOX (X=Cl, Br, I) microrods derived from Bismuth-MOFs: In situ synthesis, photocatalytic activity and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122892>
- Liang, J., Shan, C., Zhang, X., & Tong, M. (2015). Bactericidal mechanism of BiOI-AgI under visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 279, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.024>

- Liao, Y., Wang, W., Li, Z., Wang, Y., Zhang, L., Huang, X., & Cai, P. (2021). Comparative proteomic analysis reveals cytotoxicity induced by graphene oxide exposure in A549 cells. *Journal of Applied Toxicology*, 41(7), 1103–1114. <https://doi.org/10.1002/jat.4096>
- Ling-Li, W., Wan-Hong, M., Shu-Lian, W., Yu, Z., Man-Ke, J., Rui-Ping, L., Ai-Qing, Z., & Ying-Ping, H. (2012). The contrastive research in the photocatalytic activity of biobr synthesized by different reactants. *Journal of Nanomaterials*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/619761>
- Liu, J., Li, Y., Huang, L., Wang, C., Yang, L., Liu, J., Huang, C., & Song, Y. (2021). Fabrication of novel narrow/wide band gap Bi₄O₅I₂/BiOCl heterojunction with high antibacterial and degradation efficiency under LED and sunlight. *Applied Surface Science*, 567(May), 150713. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150713>
- Liu, Q. C., Ma, D. K., Hu, Y. Y., Zeng, Y. W., & Huang, S. M. (2013). Various bismuth oxyiodide hierarchical architectures: Alcohothermal- controlled synthesis, photocatalytic activities, and adsorption capabilities for phosphate in water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(22), 11927–11934. <https://doi.org/10.1021/am4036702>
- Liu, T., Wang, L., Liu, X., Sun, C., Lv, Y., Miao, R., & Wang, X. (2020). Dynamic photocatalytic membrane coated with ZnIn₂S₄ for enhanced photocatalytic performance and antifouling property. *Chemical Engineering Journal*, 379(July 2019), 122379. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122379>
- Lourghi, M., Lahmar, H., Rekhila, G., Bouatam, I., Trari, M., & Benamira, M. (2024). Fabrication of the new p-Co₃O₄/n-AgI hetero-junction and its solar photo-degradation of the fast green FCF. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 447(October 2023), 115195. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115195>
- Luis García-Bello, J. (2023). *Grafeno: producción, caracterización y aplicaciones*. 43(1), 59–80. <https://orcid.org/0000-0002-8238-8402>
- Maldonado-Vega, M., Peña-Cabriales, J. J., De Los Santos Villalobos, S., Castellanos-Arévalo, A. P., Camarena-Pozos, D., Arévalo-Rivas, B., Valdés-Santiago, L., Hernández-Valadez, L. J., & de Peña, D. L. G. (2014). Bioaerosoles y evaluación de la calidad del aire en dos centros hospitalarios ubicados en León, Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(4), 138–143.
- Mansor, E. S., Geioushy, R. A., & Fouad, O. A. (2021). PANI/BiOCl nanocomposite induced efficient visible-light photocatalytic activity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(2), 1992–2000. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04966-4>
- Martin, D. J., Liu, G., Moniz, S. J. A., Bi, Y., Beale, A. M., Ye, J., & Tang, J. (2015). Efficient visible driven photocatalyst, silver phosphate: performance, understanding and perspective. *Chemical Society Reviews*, 44(21), 7808–7828. <https://doi.org/10.1039/c5cs00380f>
- Martínez-Montelongo, J. H., Medina-Ramírez, I. E., Romo-Lozano, Y., & Castro-Gallo, I. A. (2016). *IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO FOTOCATALÍTICO PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE INTERIORES* (Issue 158) [Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/1252/416477.pdf?s>

equence=1&isAllowed=y

- Martínez-Montelongo, J. H., Medina-Ramírez, I. E., Romo-Lozano, Y., González-Gutiérrez, A., & Macías-Díaz, J. E. (2021). Development of nano-antifungal therapy for systemic and endemic mycoses. *Journal of Fungi*, 7(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/jof7020158>
- Martínez-Montelongo, J. H., Medina-Ramírez, I. E., Romo-Lozano, Y., & Zapien, J. A. (2020). Development of a sustainable photocatalytic process for air purification. *Chemosphere*, 257, 127236. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127236>
- Martínez-Villalba, J. A., Luna-Porres, M. Y., Gilio-Villa, A. M., & Arredondo-Guerrero, S. J. (2020). Microbiological and total particles suspended indoor air quality at the Universidad Iberoamericana Torreón. *Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 6(18), 20–34. <https://doi.org/10.35429/jesn.2020.18.6.20.34>
- Medina-Ramírez, I. E., Marroquin-Zamudio, A., Martínez-Montelongo, J. H., Romo-Lozano, Y., Zapien, J. A., & Perez-Larios, A. (2022). Enhanced photocatalytic and antifungal activity of ZnO–Cu²⁺ and Ag@ZnO–Cu²⁺ materials. *Ceramics International*, 48(9), 12660–12674. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.136>
- Memarzadeh, F. (2021). A Review of Recent Evidence for Utilizing Ultraviolet Irradiation Technology to Disinfect Both Indoor Air and Surfaces. *Applied Biosafety*, 26(1), 52–56. <https://doi.org/10.1089/apb.20.0056>
- Mera, A. C., Rodríguez, C. A., Pizarro-Castillo, L., Meléndrez, M. F., & Valdés, H. (2020). Effect of temperature and reaction time during solvothermal synthesis of BiOCl on microspheres formation: implications in the photocatalytic oxidation of gallic acid under simulated solar radiation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 95(1), 146–156. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05312-0>
- Mera Benavides, A. C. (2014). *Síntesis, caracterización y actividad fotocatalítica de BiOX (X=F, Cl Br, I) nanoestructurados para el tratamiento de riles de la industria vitivinícola*. 1–241. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/1741>
- Ministerio de Trabajo y Economía Social. (2020). El Ozono como desinfectante frente al coronavirus SARS-CoV-2. *Instituto Nacional de Seguridad y Salud En El Trabajo*, 2, 12. https://www.insst.es/documents/94886/712877/El+ozono+como+desinfectante+frente+al+SARS+Cov-2+%2802_07_20%29.pdf/0bc228eb-718d-490f-932d-088d46be701c
- Mirhoseini, S. H., Didehdar, M., Akbari, M., Moradzadeh, R., Jamshidi, R., & Torabi, S. (2020). Indoor exposure to airborne bacteria and fungi in sensitive wards of an academic pediatric hospital. *Aerobiología*, 36(2), 225–232. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09624-0>
- Moctezuma Zárate, M. de G., Enríquez Domínguez, E., Ramírez Mateos, P., Acosta Rodríguez, I., Cárdenas González, J. F., & Fragoso Morales, L. E. (2015). Aislamiento de hongos alérgicos en una biblioteca universitaria. *Acta Universitaria*, 25(444), 32–38. <https://doi.org/10.15174/au.2015.758>
- Morales Ramos, C. B., Camacho López, M. A., Camacho López, M. Á., & Vichis Néstor, A. R. (2022). *Nanopartículas de Óxido de Bismuto en Fase d Preparadas Mediante la Técnica Ablación Láser de Sólidos en Líquido* [Universidad Autónoma del estado de

- México]. [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/112839/Tesis_Cesar B. Morales Ramos-Versión Final.pdf?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/112839/Tesis_Cesar_B._Morales_Ramos-Versión_Final.pdf?sequence=1)
- Mousavi, E. S., Kananizadeh, N., Martinello, R. A., & Sherman, J. D. (2021). COVID-19 Outbreak and Hospital Air Quality: A Systematic Review of Evidence on Air Filtration and Recirculation. *Environmental Science and Technology*, 55(7), 4134–4147. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03247>
- Negrín Montecelo, Y. (2021). *Design of plasmonic metal- semiconductor nanohybrids for photocatalytic applications*. <https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/1906>
- Nevárez Martínez, M. C., Espinoza, P. J., Quiroz, F. J., & Bunsho, O. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectiva a través del TiO. *Avances En Química*, 12(Marzo 2018), 1–50.
- Nguyen, T. T., Johnson, G. R., Bell, S. C., & Knibbs, L. D. (2022). A Systematic Literature Review of Indoor Air Disinfection Techniques for Airborne Bacterial Respiratory Pathogens. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031197>
- Niyati, A., Haghighi, M., & Shabani, M. (2020). Solar-Assisted photocatalytic elimination of Azo dye effluent using plasmonic AgCl anchored flower-like Bi₄O₅I₂ as staggered nano-sized photocatalyst designed via sono-precipitation method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 115, 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.012>
- Nordberg, G., Langard, S., Sunderman, F. W., Mager Stellman, J., Osinsky, D., Markkanen, P., Dinman, B. D., & Atsdr. (2001). Metales: propiedades químicas y toxicidad. *Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo*, 1–76.
- Obitková, D., Mráz, M., & Pavlík, E. (2024). Virus removal by high-efficiency air (HEPA) filters and filtration capacity enhancement by nanotextiles: a pilot study. *Folia Microbiologica*, 69(2), 459–464. <https://doi.org/10.1007/s12223-024-01137-4>
- Onklay, N., Junsuwun, T., Homkham, N., Ketsakorn, A., Netmaneethipsiri, S., Wangwongwatana, S., & Changkaew, K. (2020). Assessment of indoor air quality and particle size distribution of total bacteria and staphylococcus spp in an urban hospital in thailand. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 51(6), 896–907.
- Ou, Y., & Petersen, P. M. (2021). Application of ultraviolet light sources for in vivo disinfection. *Japanese Journal of Applied Physics*, 60(10). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac1f47>
- Padervand, M., Jalilian, E., Majdani, R., & Goshadezahn, M. (2019). BiOCl/AgCl-BiOI/AgI quaternary nanocomposite for the efficient photodegradation of organic wastewaters and pathogenic bacteria under visible light. *Journal of Water Process Engineering*, 29(March), 100789. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100789>
- Pareek, A., Shanthi Sravan, J., & Venkata Mohan, S. (2019). Graphene modified electrodes for bioelectricity generation in mediator-less microbial fuel cell. *Journal of Materials Science*, 54(17), 11604–11617. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03718-y>
- Pedroza Herrera, G. (2016). Evaluación De La Actividad Foto-Catalítica Y Toxicológica De

Materiales Nano-Estructurados De Dióxido De Titanio Dopado Con Cobre. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 152(3), 28. file:///Users/andreataquez/Downloads/guia-plan-de-mejora-institucional.pdf%0Ahttp://salud.tabasco.gob.mx/content/revista%0Ahttp://www.revistaalad.com/pdfs/Guias_ALAD_11_Nov_2013.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.15446/rvfaced.v66n3.60060.%0Ahttp://www.cenetec.

- Pham, M. T., Hussain, A., Bui, D. P., Nguyen, T. M. T., You, S. J., & Wang, Y. F. (2021). Surface plasmon resonance enhanced photocatalysis of Ag nanoparticles-decorated Bi₂S₃ nanorods for NO degradation. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101755. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101755>
- Pourshirband, N., Nezamzadeh-Ejhieh, A., & Nezamoddin Mirsattari, S. (2020). The coupled AgI/BiOI catalyst: Synthesis, brief characterization, and study of the kinetic of the EBT photodegradation. *Chemical Physics Letters*, 761, 138090. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.138090>
- PROEMISA. (2020). *LUMINARIAS Y DISPOSITIVOS DE DESINFECCIÓN*. http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/313249/PRES-ENTACION-KOBY-Y-LUMINARIAS-UV-C.pdf
- Puttaraju, T. D., Manjunatha, M., Nagaraju, G., Lingaraju, K., Naika, H. R., Manjula, M. V., & Devaraja, S. (2022). The evaluation of various biological properties for bismuth oxychloride nanoparticles (BiOCl NPs). *Inorganic Chemistry Communications*, 144(August). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109850>
- Rocha Juan Carlos, & Llanes Edilberto Antonio. (2020). *Semiconductores. Conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica*. 2, 12–26.
- Rodríguez-González, C., Ayala-Fonseca, L. A., & Salas Castillo, P. (2023). Interacciones de nanoestructuras sobre óxido de grafeno. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e-23e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69765>
- Sánchez Moreno, M. (2017). Nanopartículas De Plata: Preparación, Caracterización Y Propiedades Con Aplicación En Inocuidad De Los Alimentos. *Journal of Chromatography*, 2, 50. http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Msanchez/Sanchez_Moreno_Minerva_TFM.pdf
- Sánchez Rodríguez, D. V. (2020). *Síntesis, caracterización y evaluación de oxiclورو de bismuto (BiOCl) en fotocatalisis heterogénea*.
- Sánchez Rodríguez, D. V., Escobar Barrios, V. A., & Enríquez Rosado, M. del R. (2015). *EVALUACIÓN DE OXICLORUROS DE BISMUTO COMO FOTOCATALIZADORES EN LA DEGRADACIÓN DE RODAMINA B Y FENOL*. <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1527/1/TMIPICYTS2E82015.pdf>
- Sancho, D. J. (1902). Algunas Consideraciones Sobre Catálisis. *OSTWALD: Physik. Z*, 3(1), 313.
- Sasikala, P., Bavani, T., Jagannathan, M., Preeyanghaa, M., Neppolian, B., Arumugam, N., Almansour, A. I., & Mahalingam, S. M. (2023). Single-step synthesis of 1D/3D-BiYO₃/BiOI direct Z-scheme heterostructure for the remediation of wastewater. *Optical Materials*, 145(October), 114479.

<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114479>

- Saucedo-Terán, D. R. A., Nevárez-Moorillón, D. G. V., Bautista-Margulis, D. R. G., & Manzanares Papayanopoulos, D. L. I. (2018). Materiales de soporte para el crecimiento de biopelícula en un reactor de lecho fluidizado. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 2(2), 118–130. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v2i2.74>
- Settimo, G., Gola, M., & Capolongo, S. (2020). The relevance of indoor air quality in hospital settings: From an exclusively biological issue to a global approach in the Italian context. *Atmosphere*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/atmos11040361>
- Shahbazi, M. A., Faghfour, L., Ferreira, M. P. A., Figueiredo, P., Maleki, H., Sefat, F., Hirvonen, J., & Santos, H. A. (2020). The versatile biomedical applications of bismuth-based nanoparticles and composites: Therapeutic, diagnostic, biosensing, and regenerative properties. *Chemical Society Reviews*, 49(4), 1253–1321. <https://doi.org/10.1039/c9cs00283a>
- She, R. C., Chen, D., Pak, P., Armani, D. K., Schubert, A., & Armani, A. M. (2020). *Build-at-home UV-C disinfection system for healthcare settings*. 2–8. <http://arxiv.org/abs/2003.12916>
- Shi, Y., Ma, J., Hanigan, D., Chen, Y., Qian, Y., Guo, J., & An, D. (2023). Magnetically recoverable Fe₃O₄/MoS₂/BiOI microspheres for visible light water disinfection: Molecular mechanism and transcriptomic insights. *Separation and Purification Technology*, 320, 124140. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.124140>
- Siqueira, J. R., & Oliveira, O. N. (2017). Carbon-based nanomaterials. *Nanostructures*, 233–249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49782-4.00009-7>
- Spicer, D. B. (2021a). *Disinfection*. 126(126016), 1–14.
- Spicer, D. B. (2021b). Methods and mechanisms of photonic disinfection. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 126(126016), 1–14. <https://doi.org/10.6028/JRES.126.016>
- Srivastava, S., Zhao, X., Manay, A., & Chen, Q. (2021). Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings. *Sustainable Cities and Society*, 75(July). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103408>
- Staff, R. (2015). Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad. *Revista Enfermería Del Trabajo*, 5(1), 21–27. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5213017.pdf>
- Sun, X., Lu, J., Wu, J., Guan, D., Liu, Q., & Yan, N. (2019). Enhancing photocatalytic activity on gas-phase heavy metal oxidation with self-assembled BiOI/BiOCl microflowers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 546, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.03.049>
- Swamy, G. S. N. V. K. S. N. (2021). Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality. *Heliyon*, 7(10), e08153. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08153>
- Takano, T., Morita, H., Nakamura, S., Togawa, T., Kachi, N., Kato, H., & Hayashi, Y. (2023). Evaluating the quality of life for sustainable urban development. *Cities*, 142(January), 104561. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104561>

- Tang, W., Luo, X., Fan, F., Sun, X., Jiang, X., Li, P., Ding, J., Lin, Q., Zhao, S., Cheng, Y., & Fang, Y. (2024). Zein and gum arabic nanoparticles: potential enhancers of immunomodulatory functional activity of selenium-containing peptides. *Food & Function*, 15(19), 9972–9982. <https://doi.org/10.1039/D4FO02572E>
- Tene, T., Guevara, M., Benalcázar Palacios, F., Morocho Barrionuevo, T. P., Vacacela Gomez, C., & Bellucci, S. (2023). Optical properties of graphene oxide. *Frontiers in Chemistry*, 11(July), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1214072>
- Torres Melgarejo, M. A., & Barrantes Peña, E. (2014). *Diseño de un Sistema de Ventilación para Estacionamiento Subterráneo De Tres Niveles*.
- Valdez-Castillo, M., Saucedo-Lucero, J. O., & Arriaga, S. (2019). Photocatalytic inactivation of airborne microorganisms in continuous flow using perlite-supported ZnO and TiO₂. *Chemical Engineering Journal*, 374(June), 914–923. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.231>
- van der Heijden, J. (2021). The politics of regulation: A review of the international academic literature. In *State of the Art in Regulatory Governance Research Paper–2021.08* (Issue January).
- Vargas, B. B., Rodriguez, A. A. L., Crauss, C., Barbosa, C. V., Baggiotto, C., Machado, Ê. L., & Ribeiro, V. R. (2024). Disinfection of indoor air using ultraviolet and titanium dioxide photocatalytic reactor. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 96(4), e20240304. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240304>
- Vázquez Olmos, A. R., Vega Jiménez, A. L., & Paz Díaz, B. (2018). Mecanosíntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencia y Nanotecnología*, 11(21), 29. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.21.62545>
- Veysi, R., Heibati, B., Jahangiri, M., Kumar, P., Latif, M. T., & Karimi, A. (2019). Indoor air quality-induced respiratory symptoms of a hospital staff in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7182-5>
- Vlaskin, M. S. (2022a). Review of air disinfection approaches and proposal for thermal inactivation of airborne viruses as a life-style and an instrument to fight pandemics. *Applied Thermal Engineering*, 202(October 2021), 117855. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117855>
- Vlaskin, M. S. (2022b). Review of air disinfection approaches and proposal for thermal inactivation of airborne viruses as a life-style and an instrument to fight pandemics. *Applied Thermal Engineering*, 202(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117855>
- Wang, J., Hua, C., Dong, X., Wang, Y., & Zheng, N. (2020). Synthesis of plasmonic bismuth metal deposited InVO₄ nanosheets for enhancing solar light-driven photocatalytic nitrogen fixation. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(4), 1855–1862. <https://doi.org/10.1039/c9se01136f>
- Wang, M., Li, L., Hou, C., Guo, X., & Fu, H. (2022). Building and Health: Mapping the Knowledge Development of Sick Building Syndrome. *Buildings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030287>
- Wei, Z., Feng, L., Zhi-Ming, J., Xiao-Bo, S., Peng-Hui, Y., Xue-Ren, W., Cheng, S., Zhan-Qi,

- G., & Liao, L. S. (2014). Efficient plasmonic photocatalytic activity on silver-nanoparticle- decorated AgVO₃ nanoribbons. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(33), 13226–13231. <https://doi.org/10.1039/c4ta02369b>
- Wells, W. F., & Wells, M. W. (1936). Recently Changed. *Journal of the American Medical Association*, 107, 1698–1703. <http://jama.jamanetwork.com/>
- WHO. (1990). Indoor air quality: biological contaminants. Report on a WHO meeting. *World Health Organization Regional Publications - European Series*, 31(31), 1–67.
- WHO, W. H. O. (2019). Global influenza strategy 2019-2030. In *World Health Organization*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241515320>
- WHO, W. H. O. (2024). *WHO COVID-19 dashboard*. WHO COVID-19 Dashboard. <https://data.who.int/dashboards/covid19/deaths>
- Xia, D., An, T., Li, G., Wang, W., Zhao, H., & Wong, P. K. (2016). Synergistic photocatalytic inactivation mechanisms of bacteria by graphene sheets grafted plasmonic AgAgX (X = Cl, Br, I) composite photocatalyst under visible light irradiation. *Water Research*, 99, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.055>
- Xiao, X., Xing, C., He, G., Zuo, X., Nan, J., & Wang, L. (2014). Solvothermal synthesis of novel hierarchical Bi₄O₅I₂ nanoflakes with highly visible light photocatalytic performance for the degradation of 4-tert-butylphenol. *Applied Catalysis B: Environmental*, 148–149, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.055>
- Yu-Hsun, L., Yong-Ming, D., Jing-Ya, F., & Chiing-Chang, C. (2017). A series of bismuth-oxychloride/bismuth-oxyiodide/graphene-oxide nanocomposites: Synthesis, characterization, and photcatalytic activity and mechanism. *Molecular Catalysis*, 432, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.01.002>
- Yu, X., Yan, Y., Yao, X., Ma, C., Huo, P., & Yan, Y. (2021). Ag/BiOI/C enhanced photocatalytic activity under visible light irradiation. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(8), 1116–1124. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1726181>
- Zacarías, S. M., Manassero, A., Pirola, S., Alfano, O. M., & Satuf, M. L. (2021). Design and performance evaluation of a photocatalytic reactor for indoor air disinfection. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 23859–23867. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11663-6>
- Zhang, G. H., Zhu, Q. H., Zhang, L., Yong, F., Zhang, Z., Wang, S. L., Wang, Y., He, L., & Tao, G. H. (2020). High-performance particulate matter including nanoscale particle removal by a self-powered air filter. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15502-7>
- Zhang, L., Li, Y., Li, Q., Fan, J., Carabineiro, S. A. C., & Lv, K. (2021). Recent advances on Bismuth-based Photocatalysts: Strategies and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 419(August 2020), 129484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129484>
- Zhang, Y., Lin, C., Lin, Q., Jin, Y., Wang, Y., Zhang, Z., Lin, H., Long, J., & Wang, X. (2018). CuI-BiOI/Cu film for enhanced photo-induced charge separation and visible-light antibacterial activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 235(April), 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.05.001>
- Zhang, Y., Zhu, G., Gao, J., Zhu, R., Hojamberdiev, M., Wang, C., & Liu, P. (2017). Superior-performance spherical-like Eu-doped Bi₅O₇I photocatalysts for the removal of

- organic pollutants under visible-light irradiation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(15), 11034–11045. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6887-5>
- Zhao, M., Hou, X., Lv, L., Wang, Y., Li, C., & Meng, A. (2019). Synthesis of Ag/AgCl modified anhydrous basic bismuth nitrate from BiOCl and the antibacterial activity. *Materials Science and Engineering C*, 98(October 2018), 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.116>
- Zhao, Q., Xing, Y., Liu, Z., Ouyang, J., & Du, C. (2018). Synthesis and Characterization of Modified BiOCl and Their Application in Adsorption of Low-Concentration Dyes from Aqueous Solution. *Nanoscale Research Letters*, 13. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2480-y>
- Zhong, S., Wang, B., Zhou, H., Li, C., Peng, X., & Zhang, S. (2019). Fabrication and characterization of Ag/BiOI/GO composites with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.223>
- Zhou, Y., Li, W., Zhang, Q., Yan, S., Cao, Y., Dong, F., & Wang, F. (2017). Non-noble metal plasmonic photocatalysis in semimetal bismuth films for photocatalytic NO oxidation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(37), 25610–25616. <https://doi.org/10.1039/c7cp04359g>
- Zhu, L., He, C., Huang, Y., Chen, Z., Xia, D., Su, M., Xiong, Y., Li, S., & Shu, D. (2012). Enhanced photocatalytic disinfection of E. coli 8099 using Ag/BiOI composite under visible light irradiation. *Separation and Purification Technology*, 91, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.026>
- Zhu, M., Chen, P., & Liu, M. (2011). Graphene oxide enwrapped Ag/AgX (X = Br, Cl) nanocomposite as a highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst. *ACS Nano*, 5(6), 4529–4536. <https://doi.org/10.1021/nn200088x>
- Zou, P., Li, Z., Jia, P., Luo, G., & Wang, C. (2021). Enhanced photocatalytic activity of bismuth oxychloride by in-situ introducing oxygen vacancy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 623(March), 126705. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126705>