



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE AGUASCALIENTES

**CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO FOTOCATALÍTICO
PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE INTERIORES**

POR

**JORGE HUMBERTO MARTÍNEZ MONTELONGO
PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN EL ÁREA DE TOXICOLOGÍA**

COMITÉ TUTORAL

**DRA. ILIANA E. MEDINA RAMÍREZ
DRA. YOLANDA ROMO LOZANO
M. EN C. IRMA ADRIANA CASTRO GALLO**

AGUASCALIENTES, AGS., NOVIEMBRE DE 2016



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES

M EN C JOSÉ DE JESÚS RUIZ GALLEGOS
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BASICAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTINEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO FOTOCATALÍTICO PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE INTERIORES"**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y 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. .

ATE NTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 3 de noviembre de 2016.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Iliana Ernestina Medina Ramirez'.

Dra. Iliana Ernestina Medina Ramírez
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Dr. Juan Jáuregui Rincón - Secretaría de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Consejero Académico
c.c.p.- Dr. Eugenio Pérez Molphe Balch - Secretario Técnico





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

M EN C JOSÉ DE JESÚS RUIZ GALLEGOS
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTINEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO FOTOCATALÍTICO PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE INTERIORES"**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y 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.

ATE NTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 3 de noviembre de 2016.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yolanda R. L.'.

Dra. Yolanda Romo Lozano
asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Dr. Juan Jáuregui Rincón - Secretaría de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Consejero Académico
c.c.p.- Dr. Eugenio Pérez Molphe Balch - Secretario Técnico





UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES

M EN C JOSÉ DE JESÚS RUIZ GALLEGOS
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BASICAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JORGE HUMBERTO MARTINEZ MONTELONGO** con ID 119037 quien realizó la tesis titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO FOTOCATALÍTICO PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE INTERIORES"**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y 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.

ATE NTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 3 de noviembre de 2016.

M. en C. Irma Adriana Castro Gallo
asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Dr. Juan Jáuregui Rincón - Secretaria de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Consejero Académico
c.c.p.- Dr. Eugenio Pérez Molphe Balch - Secretario Técnico





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

JORGE HUMBERTO MARTÍNEZ MONTELONGO
MAESTRÍA EN CIENCIAS ÁREA TOXICOLOGÍA
PRESENTE.

Estimado alumno:

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de tesis y/o caso práctico titulado: **"Implementación de un proceso fotocatalítico para el tratamiento de aire de interiores"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

Sin otro particular me permito saludarle muy afectuosamente.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., a 08 de noviembre de 2016

"Se lumen proferre"

EL DECANO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Ruiz Gallegos'.

M. en C. JOSÉ DE JESÚS RUÍZ GALLEGOS

c.c.p.- Archivo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis asesoras, Dra. Iliana E. Medina Ramírez, Dra. Yolanda Romo Lozano y M. C. Irma Adriana Castro Gallo, quienes apoyaron la realización de este proyecto, brindando sus consejos, observaciones y enseñanzas. Gracias por el tiempo compartido, en especial por el apoyo y respaldo durante el tiempo para la realización de este trabajo. Gracias Dra. Iliana por haberme permitido formar parte de su gran equipo de trabajo, y crear un ambiente muy agradable tanto personal como laboral.

Agradezco a mis padres, Jorge Martínez y Juana Montelongo, que han apoyado cada una de las decisiones que he tomado, por los consejos y motivación que dieron a lo largo de mi estancia en la universidad. Al igual que a mis hermanos Esmeralda Martínez y Gerardo Martínez, por formar parte de mi vida.

A mis compañeros de laboratorio que transmitieron todos sus conocimientos y permitieron una convivencia agradable, a Víctor Hugo y Diana García por su apoyo técnico y educativo para la comprensión de diversas metodologías. A todos los tesisistas de pregrado, con quien compartí el área de trabajo.

A compañeras y amigas de maestría Gladis, Cristal, y Cristina, a quienes considero unas increíbles personas, divertidas y agradables.

A mis amigos Susana, Ana, Karina, Cinthia, Gabriela, Ady, Jimena, Viridiana, Vanessa, Alberto, Ricardo, Hans, Ramon, Gustavo, Fernando y Daniel por acompañarme en esos tiempos libres para distracción y de viajes inesperados que fueron una buena terapia de relajación.

Con un agradecimiento a Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para llevar a cabo los estudios de posgrado y la elaboración del proyecto de tesis.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por su amor, apoyo incondicional y mi educación, a mis hermanos por su compañía, a mis amigos por su motivación constante y por compartir los buenos y malos momentos.

A ustedes que siempre están presentes en mi vida.

Juana Montelongo Villalobos
Jorge Martínez Martínez
Rocío Esmeralda Martínez Montelongo
Gerardo Uriel Martínez Montelongo
Susana Fuentes Paredes
Cinthia Susana Valdivia Salas
Ricardo López Regalado
Fernando Martínez Martínez
Gustavo Martínez Gaytán

En especial a Carlos Francisco Martínez Martínez† con quien inicié los planes de estudiar este posgrado, fuiste y siempre serás un gran hermano.

"La cosa mas pequeña puede causar un gran efecto que puede llegar a cambiar tu vida"

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE GRAFICOS	5
ÍNDICE DE TALBAS	6
ACRONIMOS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. El aire	11
1.2. Contaminación atmosférica	13
1.3. Contaminación de aire interior	14
1.3.1. Síndrome del edificio enfermo	15
1.4. Aire en hospitales	16
1.4.1. Bacterias de importancia intrahospitalaria	18
1.5. Tecnologías de desinfección de aire	22
1.5.1. Sistemas acoplados a luz ultravioleta	22
1.5.2. Sistemas de ozonificación	23
1.6. Nanotecnología	23
1.6.1. Historia de la Nanotecnología	24
1.6.2. Nanomateriales	25
1.7. Procesos de oxidación avanzada	27
1.7.1. Fotólisis.....	28
1.7.2. Foto-catálisis	28
1.8. Semiconductor	29
1.8.1. Dióxido de titanio	30
1.8.2. Dopaje de TiO ₂	32
1.8.3. Cobre.....	33
1.9. Síntesis de materiales nanoestructurados	34
1.9.1. Síntesis por SOL-GEL	34

1.10.	Caracterización de las nanopartículas.....	36
1.10.1.	Microscopía electrónica de barrido	36
1.11.	Material de soporte.....	38
1.12.	Reactores	39
2.	ANTECEDENTES	41
3.	Justificación	46
4.	HIPÓTESIS	48
5.	Objetivo general.....	48
6.	Objetivos particulares	48
7.	Metodología	49
7.1.	Síntesis del fotocatalizador.	49
7.2.	Soporte de perlita.....	49
7.3.	Caracterización del fotocatalizador.....	50
7.4.	Prototipo de filtro de aire.....	50
7.5.	Muestreo en salas de hospitales.	50
7.6.	Aislamiento de bacterias.....	51
7.7.	Pruebas de inhibición bacteriana.	52
7.8.	Degradación de compuestos orgánicos volátiles.....	53
8.	RESULTADOS.....	55
8.1.	Síntesis de $TiO_2-Cu^{2+}@perlita$	55
8.2.	Microscopía electrónica de barrido	56
8.3.	Muestras de aire.....	57
8.4.	Aislamiento de bacterias.....	64
8.5.	Pruebas de inhibición bacteriana	67
8.6.	Degradación de compuestos orgánicos volátiles.....	73
9.	Discusiones	75
10.	Conclusiones.....	82
11.	Glosario	83
12.	Bibliografía	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bacterias de importancia hospitalaria incubadas durante 24 horas.
 A) E. coli en agar MacConkey, B) S. aureus en agar Sal y Manitol. 20

Figura 2. Bacterias de importancia hospitalaria incubadas a 24 horas a 37°C.
 A) P. aeruginosa en agar MacConkey B) K. pneumoniae en agar MacConkey. 21

Figura 3. "Representación de los diferentes tamaños de organismos biológicos". 24

Figura 4. Tipos de materiales en nanoescala y una representación esquemática a nivel atómico (Mazo Zuluaga, 2011) 26

Figura 5 Esquema del proceso foto-cataítico. 29

Figura 6. Esquema de ubicación de bandas para un metal, un semiconductor y un aislante. 30

Figura 7. Estructuras cristalinas del dióxido de titanio, 31

Figura 8. Esquema de un gel, red sólida embebida en una fase líquida. 36

Figura 9. Representación de los sólidos cristalinos microporosos (perlita) . 39

Figura 10. Prototipo diseñado del filtro de aire para el muestreo de aire de hospitales. 50

Figura 11. Diagrama de flujo de reactor foto-catalítico para la degradación de compuestos orgánicos volátiles. 1) Bomba de aire, 2) Bomba de dosificación, 3) Cámara de mezcla, 4) Parrilla de calentamiento, 5) Reactor foto-catalítico, 6) Refrigerante, 7) Recuperación de compuesto. 54

Figura 12. Perlitas utilizadas para soportar las NP's de TiO₂-Cu²⁺ (1%). A) Perlitas lavadas de color blanco sin NP's. B) Perlitas impregnadas con las NP's, de apariencia estable con cambio de coloración a verdoso. 55

Figura 13. Microscopía electrónica de barrido a 30,000X. NP's entre 50 y 100 nm. 56

Figura 14. SEM de TiO₂-Cu²⁺@perlita a diferentes aumentos A) puntos observados en la superficie de la perlita a x350. B) Capas rugosas en

la superficie a X1,000. C) Superficie lisa donde no se adhirió el TiO_2-Cu^{2+} . D) NP's en la superficie de la perlita, se distingue la forma esférica, se observan capas en los poros de la perlita. 57

Figura 15. A. Impactador ambiental de Andersen para muestrear aire en interiores. B. Impactador ambiental conectado al prototipo de filtro de aire diseñado. 58

Figura 16. Bacterias impactadas en medios Mueller Hinton en un muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, sin el uso del filtro. 61

Figura 17.. Bacterias impactadas en medios Mueller Hinton en el muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, con el uso del filtro, probando la eficiencia del filtro..... 61

Figura 18. Perlitas usadas en el filtro después del muestreo de aire colocadas en agar Mueller Hinton, A) perlitas sin irradiación de luz donde se observó crecimiento bacteriano, y B) perlitas irradiadas con luz visible durante 5 horas, sin crecimiento bacteriano. 64

Figura 19. Bacterias aisladas en las muestras tomadas en las clínicas hospitalarias. Bacteria identificada como E. coli en agar MacConkey (A). Bacteria identificada como Y. enterocolitica en agar MacConkey (B). Bacteria identificada como Enterobacter en agar MacConkey (C). Bacteria identificada como S. aureus en agar Sal y Manitol (D)..... 65

Figura 20. Perlitas en agar específico después de las pruebas de inhibición. A) sal y manitol para el crecimiento de S. aureus. B) McConkey para el crecimiento de E. coli. 1) Perlitas del tubo 2, 2) perlitas del tubo 3, 3) perlitas del tubo 4, 4) perlitas del tubo 5. Alrededor de las perlitas se pueden distinguir en color rosa las bacterias de E. coli, entre mayor es la concentración menor es la cantidad de bacterias. 72

Figura 21. Reactor foto-catalítico diseñado para la degradación de etanol. 73

Figura 22. Formación del anillo de plata para el producto final de la foto-catalisis de etanol. 74

ÍNDICE DE GRAFICOS

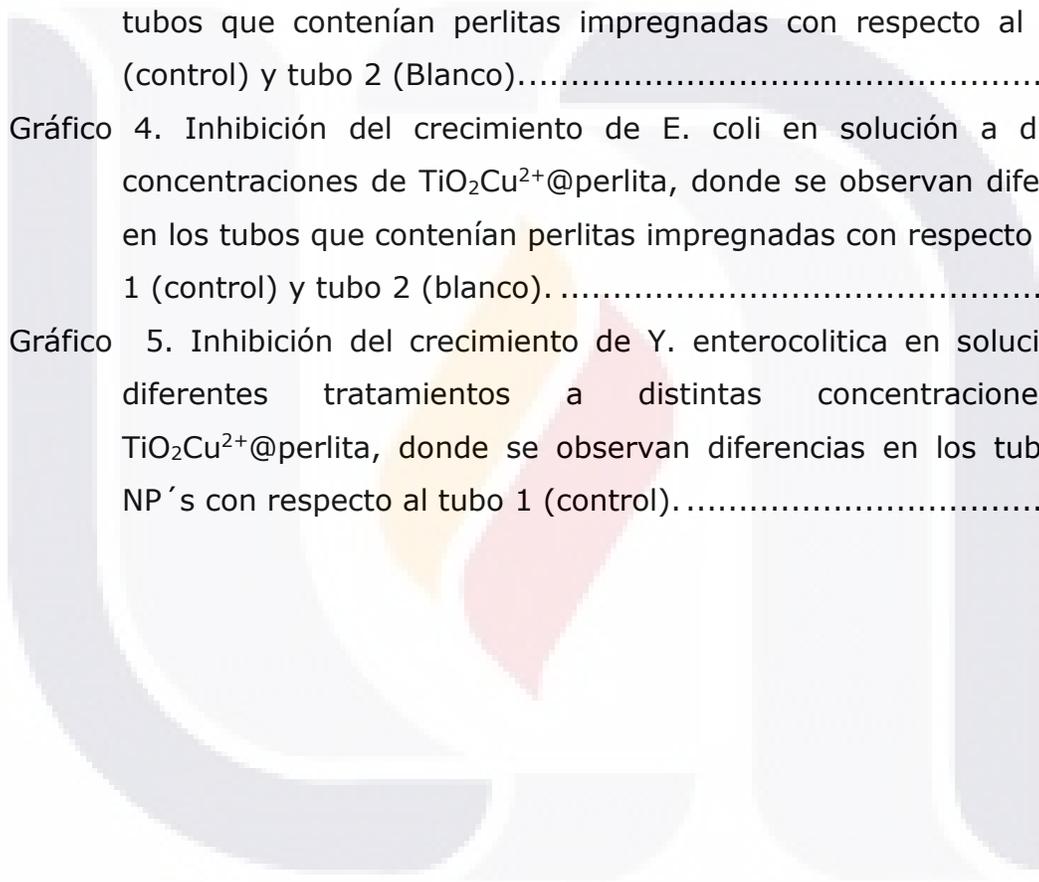
Gráfico 1. Muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, el gráfico se separa por clínicas, nivel de muestro y por el uso del filtro. 59

Gráfico 2. Disminución de la densidad microbiana total del aire con el uso del filtro en las tres clínicas hospitalarias muestreadas. 63

Gráfico 3. Inhibición del crecimiento de *S. aureus* en solución a diferentes concentraciones de TiO_2-Cu^{2+} @perlita. Se observan diferencias en los tubos que contenían perlitas impregnadas con respecto al tubo 1 (control) y tubo 2 (Blanco)..... 69

Gráfico 4. Inhibición del crecimiento de *E. coli* en solución a distintas concentraciones de TiO_2Cu^{2+} @perlita, donde se observan diferencias en los tubos que contenían perlitas impregnadas con respecto al tubo 1 (control) y tubo 2 (blanco). 70

Gráfico 5. Inhibición del crecimiento de *Y. enterocolitica* en solución con diferentes tratamientos a distintas concentraciones de TiO_2Cu^{2+} @perlita, donde se observan diferencias en los tubos con NP´s con respecto al tubo 1 (control)..... 71



ÍNDICE DE TALBAS

Tabla 1. Composición del aire atmosférico	11
Tabla 2. Concentraciones de TiO_2-Cu^{2+} @perlita para el efecto inhibitorio de las bacterias.....	52
Tabla 3. Características físicas del material sintetizado en forma de polvo y en forma soportada en la perlita.	55
Tabla 4. Carga microbiana total del aire para la prueba preliminar en las clínicas hospitalarias	59
Tabla 5. Carga microbiana total del aire para el segundo muestreo en las clínicas hospitalarias.	62
Tabla 6. Crecimiento de bacterias de las perlitas usadas en el muestreo en agar Mueller Hinton.....	64
Tabla 7. Pruebas bioquímicas para las bacterias Gram-negativas aisladas de los muestreos de aire de las clínicas hospitalarias.	66
Tabla 8. Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias Gram-positivas del muestreo de aire de la clínica hospitalaria.	67
Tabla 9. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre S. aureus irradiada con luz visible.....	68
Tabla 10. Inhibición del crecimiento de S. aureus en oscuridad.	68
Tabla 11. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre E. coli irradiada con luz visible.....	69
Tabla 12. Inhibición del crecimiento de E. coli en oscuridad.	70
Tabla 13. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre Y. enterocolitica irradiada con luz visible	71
Tabla 14. Inhibición del crecimiento de Y. enterocolitica en oscuridad.	71

ACRONIMOS



Ácido Desoxirribonucleico	ADN
Agencia del Medio Ambiente	AMA
Compuestos Orgánicos Volátiles	COV´s
Contaminación Atmosférica	CA
Crecimiento de Colonias en la Superficie de las Perlitas	CCSP
Densidad Óptica	DO
Especies Reactivas de Oxígeno	ROS
Infecciones Nosocomiales	IN
Infusión Cerebro Corazón	ICC
Microorganismos	mo´s
Microscopía Electrónica de Barrido	SEM
Nanomateriales	NM´s
Nanómetros	nm
Nanopartículas	NP´s
Norma Mexicana	NMX
Norma Oficial Mexicana	NOM
Organización Internacional del Trabajo	OIT
Organización Mundial de la Salud	OMS
Partículas Suspendidas Totales	PST
Potencial de Hidrogeno	pH
Procesos de Oxidación Avanzada	POA´s
Síndrome del Edificio Enfermo	SEE
Ultravioleta	UV
Unidades Formadoras de Colonia	UFC

RESUMEN

En la actualidad, el problema de la contaminación ambiental ha crecido considerablemente, siendo de gran enfoque a la salud debido al daño que puede causar al bienestar de los seres humanos. Garantizar la calidad de aire interior es importante, debido a que los contaminantes en el aire pueden ser de la misma magnitud o inclusive en una escala mayor a los que se encuentran en un ambiente exterior. Los contaminantes comúnmente encontrados en espacios cerrados implican una gran cantidad de microorganismos aerotransportados y diversos compuestos orgánicos volátiles, en el caso de los hospitales son un grave problema debido a que dificultan mantener un ambiente limpio. En el presente trabajo se planteó el objetivo de evaluar la actividad microbicida del $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ @perlita en la desinfección de aire de interiores (hospitales), con el fin de diseñar y construir un prototipo de filtro de aire con actividad microbicida. Para lo cual se estudió la foto-catálisis heterogénea empleando $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ (1%) como catalizador, dicho material fue sintetizado por el método de sol-gel empleando isopropóxido de titanio y sulfato de cobre como precursores. El material sintetizado se soportó por inmersión en perlitas y fue caracterizado por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), donde se observó la forma esférica y el tamaño nanométrico entre 50 y 100 nm, el material se encontró formando aglomeraciones en la superficie del soporte. Se realizó el diseño de un filtro con actividad foto-catalítica para el tratamiento de aire de interiores, para el cual se utilizó un cilindro de vidrio Chromaflex empacado con $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita (1%). La eficiencia del filtro diseñado fue evaluada en la desinfección de aire de tres clínicas hospitalarias del área de estomatología, para dicha evaluación se realizaron muestreos de aire empleando el impactador ambiental de Andersen de seis niveles, donde se logró realizar la cuantificación de la carga total de microorganismos en el aire, logrando, en estos muestreos, identificar tanto bacterias gram-negativas como bacterias gram-positivas. La eficiencia de descontaminación fue evaluada con el uso del filtro en los muestreos de aire, donde se logró inhibir hasta el 100% el crecimiento bacteriano. También se realizaron pruebas de inhibición en solución acuosa frente a algunas bacterias aisladas de los muestreos de aire, tales como *Escherichia coli*,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Staphylococcus aureus y *Yersinia enterocolitica*. Además las pruebas para determinar la actividad microbiciada del fotocatalizador, $\text{TiO}_2\text{—Cu}^{2+}$ @perlita (1%), realizadas en condiciones de oscuridad y en condiciones de irradiación bajo luz visible, mostraron que en condiciones de oscuridad el material presentó actividad microbiciada para *E. coli*, *S. aureus*, *Y. enterocolitica*, con una inhibición de 95, 82 y 84%, respectivamente; para el caso de la actividad microbiciada con irradiación de luz visible se logró inhibir el crecimiento de estas bacterias en un 100%. El prototipo de reactor foto-catalítico diseñado, también fue evaluado en la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), donde se utilizó etanol, como contaminante modelo. La degradación del mismo se cuantificó empleando métodos químicos.

ABSTRACT

Nowadays, the environmental pollution problem has considerable growth, being focus because of its impact on human health. To assure indoor air quality is very important, the concentration of pollutants in air may be equal or larger to the one encountered for outer spaces. Pathogenic microorganisms and Volatile Organic Compounds are the pollutants frequently found indoor, in hospitals are a serious problem. In this work the aim was to evaluate the microbicidal activity of $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ @perlite in indoor air (hospitals) disinfection in order to design and build an air filter prototype. Heterogeneous photo-catalysis of $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ (1%) catalyst was studied. $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ (1%) was synthesized for sol – gel method. Titanium isopropoxide and copper sulphate were used as precursors. $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ (1%) was supported in perlites for immersion. The SEM was used to characterize the material, the spherical shape and nanometric size between 50 and 100 nm was observed, forming agglomeration on the surface of the perlite. A photocatalytic filter by the indoor air treatment was designed, using a packet $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{+2}$ @perlite Chromaflex cylinder. The filter efficiency was valued in air disinfection of three stomatology hospitals clinics, for this evaluation, air sampling was performed using an Andersen impactor of six levels, the mo's total concentration was measured. Our results indicate that Gram (+) and Gram (-) bacteria were present in the air. Inhibition of the growth of these bacteria was achieved indoor air 100%. Inhibition test were performed in solution against *E. coli*, *S. aureus* y *Y. enterocolitica*, isolated form air samples, to determine the microbicidal activity of the photocatalyst, the test carried out under dark conditions and visible light condition, the results showed that in dark conditions the material had micobicidal activity for *E. coli*, *S. aureus* and *Y. enterocoitica*, whit an inhibition of 95, 82 and 84%. In visible light condition the inhibition was of 100% for the all mo's. The same prototype photocatalytic reactor was evaluated in VOC's removal, used a model pollutant, ethanol. Its degradation was quantified whit chemical methods.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El aire

La atmósfera (también conocida como aire), puede ser definida como una capa gaseosa que rodea la tierra; esta capa constituye la primera defensa que tienen las diferentes formas de vida de la incidencia de radiaciones que provienen del sol. Está constituida de una mezcla de gases, entre los que destacan, el nitrógeno (N₂), el oxígeno (O₂), en proporciones menores el dióxido de carbono (CO₂) y algunos otros gases (**Tabla 1**). Por su composición, es una sustancia indispensable para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que es el recurso natural que mayor intercambio tiene con la biosfera y los seres vivos aerobios (Terradas, 2007). Por ejemplo, el N₂ es componente básico de aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares y polímeros; además, de que los mamíferos y las plantas lo utilizan para llevar a cabo funciones vitales. Por su lado, el O₂ es usado por los mamíferos como agente oxidante en procesos bioquímicos, los pulmones pueden tomarlo del aire y el organismo lo recircula por todo el cuerpo vía torrente sanguíneo.

Tabla 1. Composición del aire atmosférico

GAS	SÍMBOLO	PORCENTAJE
NITRÓGENO	N ₂	78.08
OXÍGENO	O ₂	20.95
DIÓXIDO DE CARBONO	CO ₂	0.03
OTROS		0.94

Se ha estimado que el hombre puede vivir cinco semanas sin alimento, cinco días sin agua, pero tan solo cinco minutos sin aire (Jaramillo Juarez, Rincon, & Rico Martínez, 2009). Es por eso, que una falta de estos elementos representaría un grave problema a la salud de los seres vivos.

El aire no es un recurso limitado, sin embargo, ante la creciente preocupación por problemas de contaminación, los cuales son originados a consecuencia de la evolución tecnológica, la previsión de mayores emisiones

de contaminantes, podría traer como consecuencia una alteración en el equilibrio natural entre los ecosistemas, y afectar la salud de los humanos.

Para el control de la contaminación, se han desarrollado guías y normas que se encargan de regular la calidad del aire, las cuales son emitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) aplicadas en varios países de América latina, donde se establecen niveles de concentración máxima de varios contaminantes durante un periodo definido, niveles que se recomienda no exceder para evitar riesgos a la salud de la población, particularmente de grupos más susceptibles como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas (SEMARNAT, 2012).

Específicamente en México, la normatividad para controlar las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente se estableció en 1971 y 1972, con la ley federal para prevenir y controlar la contaminación; la norma NMX-AA-001-1972, que establece el método de prueba para determinar la densidad aparente visual del humo mediante la carta de Ringelmann y se aplica para humos producidos por combustión en fuentes estacionarias, que varían de transparente a gris y negro. Luego se emitieron las normas NMX-AA013-1976, para evaluar la capacidad del humo proveniente de los vehículos automotores equipados con motor diesel, y la norma NMX-AA-027-1976, para determinar las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. En 1988 se publicó la ley general de equilibrio ecológico y la protección al ambiente con su respectivo reglamento.

Las normas oficiales mexicanas (NOM) se emplean para controlar los contaminantes orgánicos e inorgánicos emitidos por fuentes fijas y móviles (Jaramillo Juarez, Rincon, & Rico Martínez, 2009). Al día de hoy en México se norman los siguientes contaminantes atmosféricos: dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a $10\mu\text{m}$ de diámetro (PM10) y plomo (Pb) (COFEPRIS, 2015).

En el caso particular de la ciudad de Aguascalientes, la población se duplicó en los últimos años, y este crecimiento ha tenido como consecuencia varios efectos, entre los que destacan los impactos sobre el medio ambiente, es por eso que desde 1997 se puso en operación la estación automática de monitoreo atmosférico para monitorear la calidad del aire de la ciudad (SECRETARIA MEDIO AMBIENTE, 2010).

1.2. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica (CA) es definida como la presencia de elementos contaminantes en la atmósfera que alteran su composición y afectan a cualquier componente del ecosistema. Desde un punto de vista antropocéntrico la CA se refiere a los contaminantes que afectan la salud o el bienestar humano (Oyarzún, 2010).

La CA resulta ser uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial, siendo cada vez más objeto de atención como un problema de salud pública. Esta contaminación es el resultado de actividades humanas innumerables, entre las que más han causado impacto en los últimos tiempos se destaca la contaminación por industrias, por transporte a base de combustible, por quema de carbón, entre otras. En el siglo XIII, la enfermedad de la reina Leonor, es la primera evidencia de la enfermedad originada por la CA causada por los humos de los artesanos (Parker, 2001).

Los contaminantes atmosféricos son tan numerosos que resulta difícil agruparlos para su estudio, una agrupación puede ser en gaseosos, líquidos o sólidos, en la atmosfera pueden subsistir como partículas de polvo, materia en partículas, aerosoles, vapor, neblinas, humos, etc. Normalmente se pueden encontrar como: óxidos de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, COV's, partículas, aerosoles, oxidantes, sustancias radioactivas.

Para verificar la contaminación de aire se cuenta con diversas metodologías para monitorear los gases contaminantes, estaciones meteorológicas que miden partículas suspendidas, algunos otros gases como el ozono que es medido por fotometría UV, el CO por fotometría infrarroja de

filtro de correlación de gas, el NO₂ por quimioluminiscencia de fase gaseosa, SO₂ por fluorescencia pulsante.

Existen además, diversos sistemas para el análisis de organismos aerotransportados, un ejemplo de estos es el impactador en cascada de Andersen, el cual es un muestreador multiorificio que separa las partículas en fracciones según su tamaño, de este muestreador existen dos modelos, que utilizan 2 y 6 niveles, cada nivel consta de cabezales perforados, ya sea con 200 o 400 orificios, el diámetro de los orificios disminuye progresivamente en sentido descendente (González, 2015). La captación se basa en la inercia de las partículas, que son retenidas de mayor a menor tamaño, facilitando el aislamiento e identificación de las especies bacterianas.

1.3. Contaminación de aire interior

Es importante aclarar que la contaminación del aire no es exclusiva de espacios exteriores, los espacios cerrados también presentan este problema, esta es conocida como contaminación de aire interior; este término suele aplicarse a ambientes de interior no industriales como: edificios de oficinas, edificios públicos y viviendas particulares.

Las concentraciones de contaminantes en espacios interiores, suelen ser de la misma magnitud que las encontradas habitualmente en el exterior, mucho menores que las existentes en el medio ambiente industrial, donde se aplican normas relativamente bien conocidas con el fin de evaluar la calidad del aire (Guardino Solá, 1998). Y en algunos casos, pueden ser mayores debido a que los contaminantes generados en los espacios interiores se unen con aquellos que penetran desde el exterior, se dispersan o depositan como polvo, y pueden aumentar gradualmente; en esta categoría se incluye el humo de tabaco, las partículas biológicas y no biológicas, COV's, NO_x, Pb, CO, asbesto y algunos productos químicos sintéticos; esto dependerá de las actividades de cada establecimiento. (Wang, Ang, & Tade, 2007; SEMARNAT, 2012).

Los contaminantes biológicos de espacios interiores son los microorganismos (mo´ s) patógenos aerotransportados, capaces de ocasionar problemas de salud, los cuales van desde irritaciones leves hasta el desarrollo de graves enfermedades. Este tipo de aerotransportados (virus, bacterias u hongos) son extremadamente pequeños y pueden permanecer suspendidos en una corriente de aire por largos períodos de tiempo, esto los hace ser un peligro de infección en lugares de alto riesgo (hospitales o clínicas), además de que en lugares delimitados son extremadamente peligrosos (De La Rosa, Mosso, & Ullían, 2002). La mala calidad del aire puede causar problemas de salud tales como: alergias, enfermedades respiratorias, molestias menores, como migrañas e irritación ocular.

1.3.1. Síndrome del edificio enfermo

El síndrome del edificio enfermo (SEE) fue definido originalmente por la OMS en 1983, el término es comúnmente utilizado para describir el conjunto de síntomas de malestar que no tienen una etiología clara, generalmente, atribuidas a la mala calidad del aire de un edificio en particular (Wang, et al., 2008; Thörn, 1998). La Organización Internacional del Trabajo (OIT) lo define como un fenómeno producido cuando el 20% de las personas reportan síntomas asociados a sus lugares de trabajo con la asociación específica de la calidad del aire. Las circunstancias más sugestivas son la presencia de síntomas comunes entre un grupo de encuestados que están presentes en el edificio y ausentes cuando no lo están. Los síntomas de malestares no específicos más abundantes son en ojos, nariz, garganta y piel, así como síntomas generales como letargo y dolor de cabeza (Norhidayah, Chia-Kuang, Azhar, & Nurulwahida, 2013).

En estos edificios, la ventilación artificial es usada para el bienestar de las personas, sin embargo, se ha observado que los trabajadores de edificios con aire acondicionado experimentan más síntomas que los de los edificios con ventilación natural (Jaakkola & Miettinen, 1995), lo cual ha sido provocado, ya que en la actualidad muchos de los edificios se construyen de

manera hermética con el fin de ahorrar gastos de energía. Al no contar con ventilación natural, el aire dentro de estos edificios es recirculado a diferentes áreas y por consiguiente los contaminantes pueden acumularse gradualmente. Algunos contaminantes característicos que provocan SEE son el humo de cigarro, materiales de construcción, materiales de aislamiento, adhesivos utilizados en alfombras, productos de limpieza, químicos utilizados en equipos de oficina como fotocopiadoras, faxes, entre otros (SEMARNAT, 2012). El aire aclimatado artificialmente es recirculado por ductos distribuidos a lo largo del establecimiento, donde, el sistema cuenta con filtros capaces de atrapar partículas de tamaño grande, sin embargo, las partículas más pequeñas (virus, bacterias, hongos) pueden atravesar, y por las condiciones antes mencionados los mo's crean un ambiente perfecto para poder desarrollarse, y recircular con el aire en el establecimiento.

Por tanto, el SEE es un complejo espectro de síntomas de mala salud asociados con el aire, pero hay poca evidencia de que la exposición microbiana, sea un factor significativo. Sin embargo, la falta de aseo y la poca ventilación que presentan es un factor importante para el desarrollo de diversos mo's (Crook & Burton , 2010). Los edificios con propósitos no residenciales como los complejos de oficinas, unidades comerciales, y edificios institucionales (escuelas, universidades, hospitales, guarderías, y casas de retiro), experimentan una gran variedad de quejas que se pueden asociar con la mala calidad del aire interior (Godish, 2001).

1.4. Aire en hospitales

En latín, "hospitalis" es un adjetivo que quiere decir amable y caritativo con los pacientes. Para la OMS, el hospital es parte de una organización médica y social cuya misión es proporcionar a la población una asistencia médico-sanitaria. La ventilación debe cubrir las necesidades clínicas y proporcionar las condiciones higiénicas adecuadas con el fin de proteger a los pacientes y a los profesionales que realizan sus tareas en éste ámbito (Rosell Farrás & Muñoz Martínez, 2010).

La contaminación hospitalaria es compleja en función de la diversidad de actividades, el tamaño de su comunidad, la pluralidad de personal involucrado, la infinidad de materiales químicos que se manejan como medicamentos, materiales utilizados para prevención, curación, atención y tratamiento, productos de limpieza, desinfectantes, materiales para diagnóstico clínico y de laboratorio, entre otros (Sandoval Flores, 2014). Sin embargo, debido a la cantidad de personas que ingresan con problemas de salud, resulta complejo mantener un estado estéril en todas las salas, siendo complicado asegurar la salud de los pacientes.

El ambiente hospitalario también puede estar contaminado frecuentemente con patógenos que presentan riesgos de contaminación cruzada. Siendo muy comunes las infecciones nosocomiales (IN), que pueden ser definidas como una infección contraída en el hospital por un paciente internado por una razón distinta de la que ingreso. Las IN se mantienen como un problema de magnitud considerable tanto en países desarrollados como en aquellos carentes de recursos.

Las IN pueden ser de dos tipos: a) endógenas, causadas por organismos presentes en la microbiota normal del paciente; y b) exógenas, causadas por organismos adquiridos por exposición a personal del hospital, dispositivos médicos o ambiente hospitalario. Se ha estimado que aproximadamente el 5.5% de los pacientes internados desarrollan una infección hospitalaria (Granados & Villaverde, 2003).

Las enfermedades infecciosas se transmiten fácil y rápido por varias razones, algunas son debidas a que muchos pacientes no presentan defensas hacia algunas infecciones por la propia enfermedad, algunos pueden ser portadores de bacterias que causan estas infecciones, además de que la presencia de una gran cantidad de pacientes aumenta el riesgo de una contaminación cruzada (Madigan, Martinko, Dunlap, & Clark, 2009). El uso de antibiótico de manera inadecuada para controlar diversas infecciones bacterianas, provoca que los mo ´s adquieran resistencia a diversos productos antibióticos.

Mycobacterium tuberculosis causante de tuberculosis es un ejemplo de bacterias que se transmiten en el aire y puede causar brotes en hospitales, los trabajadores sanitarios infectados pueden propagar la infección entre los pacientes y miembros del personal. Del mismo modo, el Norovirus se transmite por aerosol, por lo cual resulta difícil contener en una sola sala de hospital (Eames, Tang, Li, & Wilson, 2009).

1.4.1. Bacterias de importancia intrahospitalaria

Las bacterias y hongos son las causas más importantes de IN, muchos de estos organismos pueden dispersarse vía aérea por lo que la exposición a estos patógenos potenciales debe ser controlado y para ello es necesario evaluar la composición y concentración de mo's aéreos en clínicas y hospitales (Maldonado Vega, et al., 2014).

Las bacterias de importancia intrahospitalaria han comenzado a ser foco de atención debido a la contaminación cruzada entre pacientes, la incidencia de algunas bacterias persistentes que pueden permanecer en el aire, presentan la capacidad de infección entre pacientes en diferentes áreas de hospitales. Los tipos bacterianos que pueden encontrarse varían según el hospital, el área, e incluso el horario de muestreo. Sin embargo, existen géneros que pueden considerarse como los más frecuentes, como es el caso de *Bacillus*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, entre otras (Agbagwa & Onyemaechi, 2014).

Escherichia coli. Es un bacilo Gram-negativo, con una sola cadena espiral de ADN, móvil, aerobio y aerobio facultativo, con flagelos periticos (**Figura 1-A**). Del género, es la más frecuente y la más relevante desde el punto de vista clínico. Este microorganismo se asocia con una gran variedad de enfermedades, la mayoría de las cuales son endógenas, es decir, algunas forman parte de la microbiota normal del paciente, son capaces de producir infección cuando las defensas se encuentran alteradas. Un gran número de células de *E. coli* están presentes en el aparato digestivo, y son causa

frecuente de septicemia, meningitis neonatal, infecciones del aparato urinario y gastroenteritis (Murray, Rosenthal, & Pfaller, 2008).

Las septicemias son muy preocupantes en hospitales, por la gravedad de su pronóstico, pueden instalarse en el hígado, en las vías respiratorias u en otros órganos. En los casos de perforación intestinal, estas bacterias son responsables de la peritonitis consecutiva, las infecciones por *E. coli* se dan en más del 70% de los casos. Algunos mecanismos patogénicos son: enteropatógena, produce brotes de diarrea en hospitales infantiles; enterotoxigénica, causa diarrea de leve a moderada-severa en lactantes; enteroinvasiva, coloniza el epitelio de la mucosa y produce necrosis focal con desprendimiento de mucosa y lesiones sangrantes; enterohemorrágica, produce colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico; enteroagregativa, presenta adherencia agregativa, con la que se fijan a la mucosa intestinal produciendo efectos citopáticos sobre la mucosa intestinal; y difusamente adherente, se presenta en niños de edades entre uno y cinco años, produce diarrea acuosa sin sangre (Romero, 2007).

Staphylococcus aureus. Las bacterias del género *Staphylococcus* son comensales y parásitos hospederos en humanos y animales, causantes de serias infecciones. *S. aureus* es una bacteria aerobia facultativa, Gram-positiva, inmóvil, no esporulada, produce varias toxinas que contribuyen a su patogenicidad porque aumentan su capacidad de invadir el cuerpo o dañar los tejidos. (**Figura 1-B**). Las colonias producen una pigmentación amarilla que está asociada muy habitualmente a diversas patologías, que incluyen furúnculos, pústulas, neumonía, osteomielitis, meningitis y artritis.

En la actualidad, este microorganismo se encuentra como el principal causante de las IN. Aproximadamente el 15% de los adultos sanos portan esta bacteria en la nasofaringe, aunque se ha descrito que la incidencia más abundante es en pacientes hospitalizados, personal sanitario, personas afectadas con enfermedades eccematosas de la piel (Madigan, Martinko, Dunlap, & Clark, 2009). La infección de heridas quirúrgicas por *S. aureus* es un problema frecuente en hospitales, principalmente por la capacidad de este

microorganismo para desarrollar rápidamente resistencia a diversos antibióticos, como es el caso de *S. aureus* penicilino resistente, que conlleva a que aumente el riesgo de contagio en los pacientes internados (Tortura, Funke , & Case , 2007).

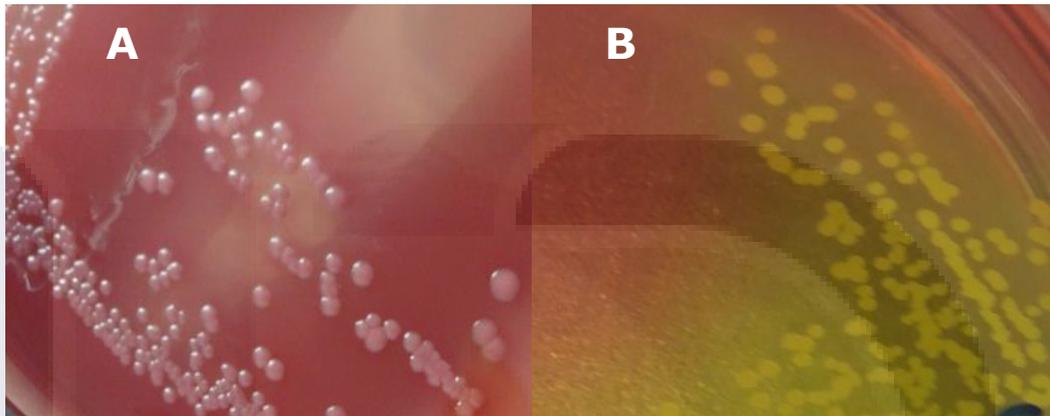


Figura 1. Bacterias de importancia hospitalaria incubadas durante 24 horas. **A)** *E. coli* en agar MacConkey, **B)** *S. aureus* en agar Sal y Manitol.

Pseudomonas aeruginosa. Es una bacteria Gram-negativa, móvil, y aerobia (**Figura 2-A**). Además, es un patógeno oportunista en humanos y en plantas, puede instalarse en cualquier órgano o tejido (desde una simple herida o quemadura), invadir el oído externo y colonizar las vías urinarias, los pulmones, el endocardio, la córnea y los huesos. Es comensal del intestino en 10% de individuos sanos, 12% de pacientes externos, 38% de enfermos hospitalizados y hasta 78% en pacientes con colostomía.

Estas mo's son ubicuos, es decir, se pueden encontrar en diversos espacios, como en la tierra, en la materia orgánica en descomposición, en la vegetación, en el agua, lo que ocasiona un grave problema debido a que existen reportes de incidencia en ambientes hospitalarios, ambientes húmedos, en alimentos, en los baños, en respiradores, incluso en equipos de tratamiento de diálisis. Estas bacterias tienen la capacidad de usar compuestos orgánicos como fuentes de carbono y de nitrógeno, por lo que les resulta sencillo permanecer en las superficies antes mencionadas.

P. aeruginosa posee una gran resistencia a una gran cantidad de antibióticos, de los cuales se han identificado numerosos mecanismos, sin

embargo, la mutación de porinas constituye el principal mecanismo de resistencia, produciendo diferentes β -lactamasas que inactivan diversos antibióticos β -lactámicos (Castro, 2012).

Klebsiella pneumoniae. Es la especie con mayor relevancia clínica dentro del género, desempeñan un importante papel como causa de las enfermedades infecciosas oportunistas. Las bacterias pertenecientes a este género poseen una cápsula prominente que confiere el aspecto mucoso a las colonias aisladas y la mayor virulencia de los mo's *in vivo*. Aunque la presentación clásica de la neumonía por *K. pneumoniae* (**Figura 2-B**) es una neumonía lobar, de carácter necrotizante, que afecta por lo general a pacientes con enfermedades de base, casi todos los pacientes con enfermedad pulmonar presentan una bronconeumonía o una bronquitis, con frecuencia adquiridas en el hospital (Puerta García & Mateos Rodríguez, 2010), también es capaz de infectar heridas, de partes blandas y del aparato urinario (Murray, Rosenthal, & Pfaller, 2008).

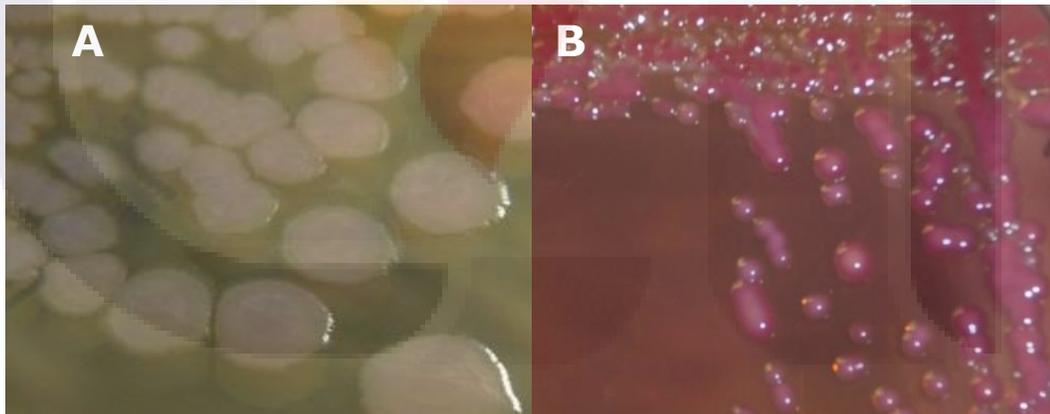


Figura 2. Bacterias de importancia hospitalaria incubadas a 24 horas a 37°C. A) *P. aeruginosa* en agar MacConkey B) *K. pneumoniae* en agar MacConkey.

1.5. Tecnologías de desinfección de aire

Existen diversas tecnologías para el tratamiento de la desinfección de aire. El desarrollo de la ingeniería, la nanotecnología y otras ciencias, han ayudado a desarrollar sistemas para la descontaminación del aire debido al aumento constante de problemas de salud vinculados a los mismos. Entre estos sistemas se encuentran: sistemas de luz ultravioleta (UV), ozonificación y la foto-catálisis (sección 1.7).

1.5.1. Sistemas acoplados a luz ultravioleta

Los sistemas de ventilación fundamentalmente usados para regular las condiciones en cuanto a la temperatura en aire de interiores, presentan inconvenientes por la falta higiene, temperatura y humedad, siendo estas variables las que permiten que se cree un ambiente apropiado para el crecimiento de bacterias y hongos.

El acoplamiento de luz UV en los equipos de aire acondicionado, ha permitido limpiar el sistema mediante la aplicación continua de radiación UV. La inactivación de las bacterias está basada en la rápida modificación de su ADN por la incidencia de radiación. En el proceso la absorción natural y directa de la energía electromagnética por los mo's y reacciones fotoquímicas intracelulares resultantes cambian la estructura bioquímica de las moléculas en nucleoproteínas y estas, a su vez, pierden las propiedades esenciales para su supervivencia.

Aunque la luz UV es un agente altamente eficaz contra el crecimiento de bacterias, tiene limitaciones, una de ellas es que no es muy penetrante. Es decir, la luz debe mantenerse sin interferencias, y la bacteria debe estar en un ambiente transparente, para recibir directamente la radiación. Los contaminantes, tales como, el polvo y la suciedad en el aire pueden interferir con la desinfección. Además, la intensidad de luz UV disminuye con el tiempo y, por lo tanto, requiere un seguimiento regular. Las precauciones de seguridad especiales que se deben tomar son también un factor limitante (Madigan, Martinko, Dunlap, & Clark, 2009).

1.5.2. Sistemas de ozonificación

El OZONO (O_3) es un componente natural del aire limpio y seco, como el nitrógeno, oxígeno, argón, y otros gases. Se produce cuando las moléculas de O_2 son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con otra molécula de oxígeno para formar este gas inestable.

Es muy conocido que el O_3 tiene una acción fungicida y desodorizante; destruyendo con gran rapidez, todos los gérmenes y alérgenos que circulan por el aire, así como toxinas producidas por diversa cantidad de gérmenes que circulan libremente en el ambiente. El O_3 interfiere e interrumpe el metabolismo de las células bacterianas, a través de la inhibición y el bloqueo de la operación metabólica del sistema de control enzimático. Al entrar en contacto con la pared celular bacteriana, realiza una reacción llamada explosión oxidativa creando, literalmente, un pequeño agujero en esta estructura vital que protege a la célula y le confiere la forma a la célula bacteriana, por lo que, en consecuencia, esta comienza a perder su forma, mientras que más moléculas de O_3 siguen perforando la célula.

El proceso de ozonificación es una tecnología más compleja que la cloración o desinfección con luz UV, este proceso requiere equipos complicados y sistemas de contacto eficientes; es muy reactivo y corrosivo requiriendo de materiales resistentes a corrosión como el acero inoxidable. El O_3 es extremadamente irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen del sistema deben ser destruidos para evitar contacto con el personal de las áreas (Environmental Protection Agency, 2011).

1.6. Nanotecnología

La nanotecnología es una técnica empleada para modificar y manipular la materia, para desarrollar estructuras o dispositivos funcionales, con dimensiones menores a los 100 nanómetros (nm). Se puede describir como aquella que estudia estructuras u objetos con al menos una de sus dimensiones en la escala de nanómetros. El prefijo "nano" viene del latín

“*nanus*”, que significa muy pequeño, donde un nanómetro corresponde a la millonésima parte de un milímetro (**Figura 3**) (Cheang Wong, 2005).

La química, la biología y la física son algunos de los campos de aplicación de la nanotecnología, que aparece como una esperanza para la solución de diversos problemas, como la elaboración de materiales biocompatibles, producción de energía más limpia, eficiente y sustentable, tratamiento de aguas, remediación ambiental, síntesis de medicamentos, medicina regenerativa (Canudas Vidal, 2013).

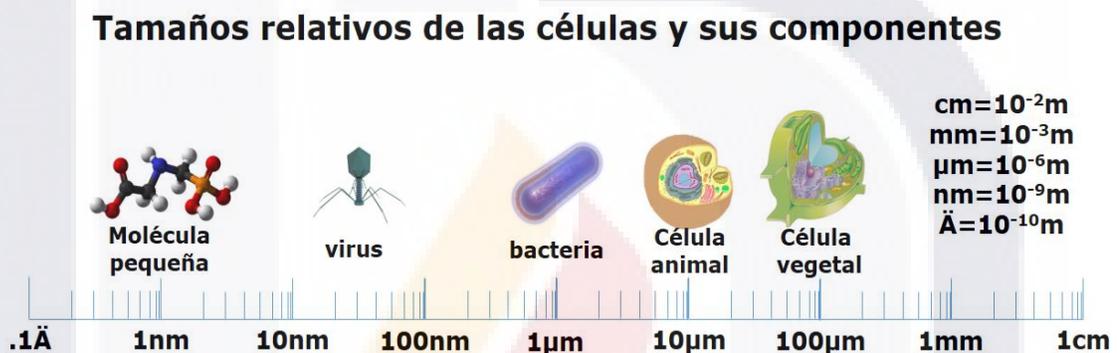


Figura 3. “Representación de los diferentes tamaños de organismos biológicos”.
Modificado de (**CANUDAS VIDAL, 2013**)

1.6.1. Historia de la Nanotecnología

La historia de la nanotecnología es difícil de atribuir a una sola persona, debido a que existen reportes de varios trabajos en la historia, como los antiguos pigmentos empleados para teñir el vidrio Romano. Robert Brown, Louis Neel, Santiago Ramon y Cajal, Richard Feynman, Grad Binning, Albert Fert y muchos otros desarrollaron los principios de la nanociencia antes del nacimiento definitivo de la nanotecnología.

Por un lado, los artesanos de la edad media aprendieron que mezclar pequeñas cantidades de oro y plata con vidrio se obtenían diferentes colores, ideales para los vitrales de las iglesias, entonces no se conocía por qué el tratamiento producía este efecto, hoy se sabe que el color se debe a la formación de NP's de oro y plata con diámetros menores a 100 nm. Por otro lado, el azul maya, pintura usada en Mesoamérica es una pintura resistente

al paso de los años, está formada por una mezcla de índigo con arcilla de cavidades de tamaños nanoscópicos (Takeuchi, 2009).

Muchos relatos sobre el origen de la nanotecnología empiezan con la conferencia histórica de Richard Feynman en 1959 en el Institute of Technology de California titulada "*There is plenty of room at the bottom*", donde presentó la idea de obtener objetos macroscópicos, construidos átomo por átomo o molécula por molécula, fue ganador del premio Nobel de física en 1965, debido a que contribuyó a la electrodinámica cuántica; sin embargo, no fue hasta 1986, cuando Eric Drexler publicó *Engines of Creation*, donde relató promesas y posibilidades de la nanotecnología (Morrow, Bawa, & Wei, 2007).

"La nanotecnología será la ciencia del siglo XXI, está abriendo el camino a la próxima revolución industrial; el impacto social, cultural y económico que tendrá en nuestra vida diaria es apenas imaginable, la nanotecnología bien puede cambiar el mundo" (Cheang Wong, 2005).

1.6.2. Nanomateriales

Los nanomateriales son materiales con propiedades morfológicas más pequeñas que 100 nm en al menos una dimensión. A pesar del hecho de que no hay consenso sobre el tamaño mínimo o máximo, varios autores restringen su tamaño de 1–100 nm, una definición situaría la nanoescala entre micro escala y la escala atómica/molecular.

Estos materiales pueden ser clasificados por sus dimensiones: nanomateriales de cero-dimensiones (0-D), como los nanocristales; mono dimensionales (1-D), como las nano fibras, los nanohilos y los nanotubos; bidimensionales (2-D) como lo son las nano capas o películas delgadas; y tridimensionales (3-D) (**Figura 4**) Estos materiales se pueden manejar en forma de polvo, en suspensión líquida, en forma de gel, entre otras.

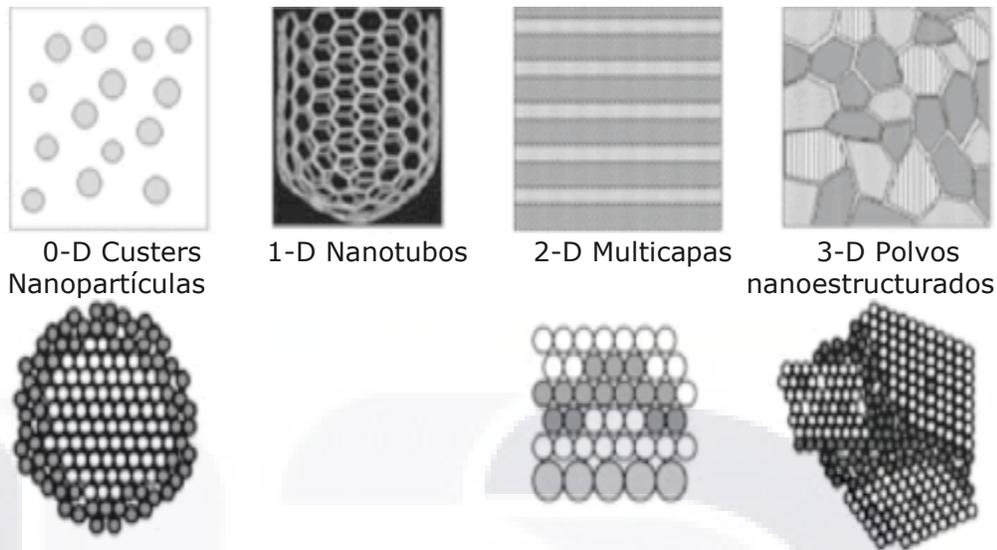


Figura 4. Tipos de materiales en nanoescala y una representación esquemática a nivel atómico (Mazo Zuluaga, 2011)

Los nanomateriales que consisten en cristales y en interfaces de tamaño nanométrico pueden clasificarse de acuerdo con su composición química y forma dimensional.

- Cluster o polvos (MD=0) generalmente presentan la misma composición química, por ejemplo, los polímeros semi-cristalinos, y películas delgadas de multicapas cristalinas separadas por una capa amorfa.
- Multicapas (MD=1), se encuentran los materiales con diferente composición química. Es posible que las estructuras de pozos cuánticos sean el mejor ejemplo de esta familia.
- Capas superpuestas ultra-finas (MD=2). Los espesores de las capas son menores a 100 nm, se incluyen todos los materiales que tienen una composición química diferente de su materia de conformación.
- Nanomateriales (MD=3). Todos los nanomateriales formados por partículas nanométricas (capas, varillas, cristales) dispersos en una matriz de composición química diferente (Hofmann, 2011).

1.7. Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA's) pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet) altamente reactivos ya que presentan un elevado potencial de oxidación ($E^\circ=2.8\text{V}$), esta característica los hace de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno. Estos métodos se pueden utilizar para la remoción de agentes contaminantes de aguas, sobre todo a pequeña y mediana escala, también se ha estudiado la utilización para descontaminación de aire, suelo y desactivación de bacterias y virus.

Sus principales ventajas son:

- Tienen capacidad de llevar a cabo una mineralización de contaminantes de origen orgánico, la descomposición de compuestos inorgánicos hasta iones (cloruros, nitratos...) y dióxido de carbono.
- Presentan reactividad con la mayoría de compuestos orgánicos, importante debido a que los tratamientos secundarios y terciarios de aguas no consiguen una degradación adecuada de algunos contaminantes.
- Entra en la tecnología limpia, ya que descompone a productos inocuos los reactivos utilizados como oxidantes.
- Son sistemas de tratamiento modulares, compactos y automatizables, permitiendo la posibilidad de operar de manera continua y discontinua (Baraza & Esplugas, 2000).

Algunas desventajas son:

- En algunos casos pueden tener costos operacionales muy elevados, debido a los equipos tan complejos.
- Algunos equipos requieren la adición de reactivos en forma constante y requieren de uso de agentes oxidantes.

1.7.1. Fotolisis.

Los métodos fotolíticos para la degradación de contaminantes disueltos se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que será absorbida por distintas moléculas para alcanzar estados excitados en un tiempo necesario para experimentar reacciones. La presencia de radiación UV produce la fotólisis de un gran número de compuestos orgánicos, empleando longitudes de onda de 210–230 nm. La eficiencia del proceso depende principalmente de la capacidad de absorción de radiación y de la presencia de otros compuestos que absorben la misma longitud de onda.

En los procesos de oxidación fotolíticos normalmente se utilizan lámparas de mercurio de baja presión (254nm, 471 KJ/mol) empleadas tanto en la desinfección como en la depuración de las aguas. Sin embargo, es necesario llevarlas a longitudes de onda más bajas (170-200nm), ya que llevan asociada una mayor energía (704-598 KJ/mol) y son más eficientes en la ruptura de los enlaces de los compuestos orgánicos (Garcés Giraldo, Mejía Franco, & Santamaría Arango, 2003), lo que implica un mayor riesgo para los operarios de estos sistemas.

1.7.2. Foto-catálisis

La foto-catálisis ha sido muy estudiada en los últimos años gracias a su versatilidad como un proceso de degradación de contaminantes orgánicos. No solo puede ser activada bajo la influencia de la luz solar, también puede generarse con luz artificial, con la ventaja adicional de que puede ser utilizada solo una longitud de onda específica para el material semiconductor (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006).

El proceso se basa en la transferencia de carga entre un semiconductor y una solución contaminada de agua o de aire. Un aspecto relevante es la generación del par electrón-hueco, ya que este modelo explica la absorción de los fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos (Pedroza Vera, 2014). Cuando el semiconductor es irradiado con fotones cuya energía es mayor o igual que su ancho de banda prohibida, la absorción de estos

provoca que un electrón de la banda de valencia sea promovido a la banda de conducción, generando así el par electrón-hueco.

En la foto-catálisis oxidativa, los huecos tienen la capacidad de oxidar moléculas que son adsorbidas directamente o por la formación de OH^\bullet , mientras que los electrones son atrapados por un oxidante. Si la foto-catálisis se emplea para reducir compuestos inorgánicos, como cationes metálicos, estos capturan los electrones foto-generados, mientras que grupos OH^\bullet u otras moléculas adsorbidas ceden electrones a los huecos (**Figura 5**). Si el semiconductor tiene especies adsorbidas en su superficie, se produce la transferencia de los electrones de la banda de conducción hacia moléculas aceptadoras, mientras que moléculas oxidantes o dadoras ceden electrones a los huecos de la banda de valencia (Portela Rodriguez, 2008).

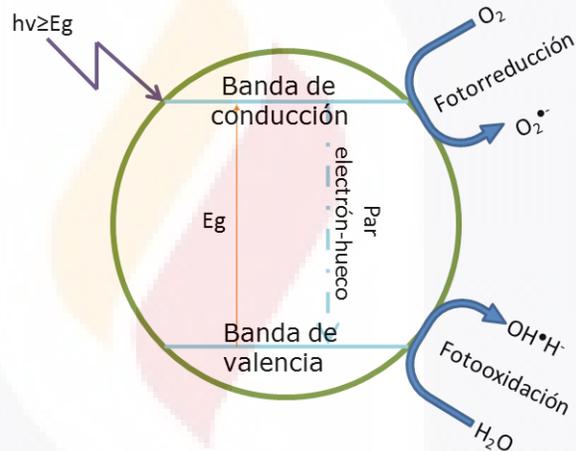


Figura 5 Esquema del proceso foto-catalítico.

1.8. Semiconductor

Los semiconductores se caracterizan debido a que poseen una conductividad directamente proporcional a la temperatura, contrario a los metales. Tienden a ser malos conductores comparados con los metales, pueden ser clasificados dependiendo su banda de energía (**Figura 6**). Se pueden describir como sólidos cuyas bandas de energía están divididas por una pequeña brecha denominada *Band Gap* (banda prohibida). La banda de valencia, contiene electrones que participan en uniones atómicas, mientras que la banda de conducción contiene electrones involucrados en las corrientes

eléctricas. Debido a esto, es más fácil para los electrones trasladarse de la banda de valencia a la banda de conducción. Por ejemplo, si aumenta la temperatura, los electrones pueden absorber la energía necesaria para promoverse a la banda superior. Así se logra aumentar la cantidad de electrones en la banda de conducción y disminuirlos en la de valencia, pareciéndose más a un metal (Travizano, Romano, & Kamienkowski, 2002).

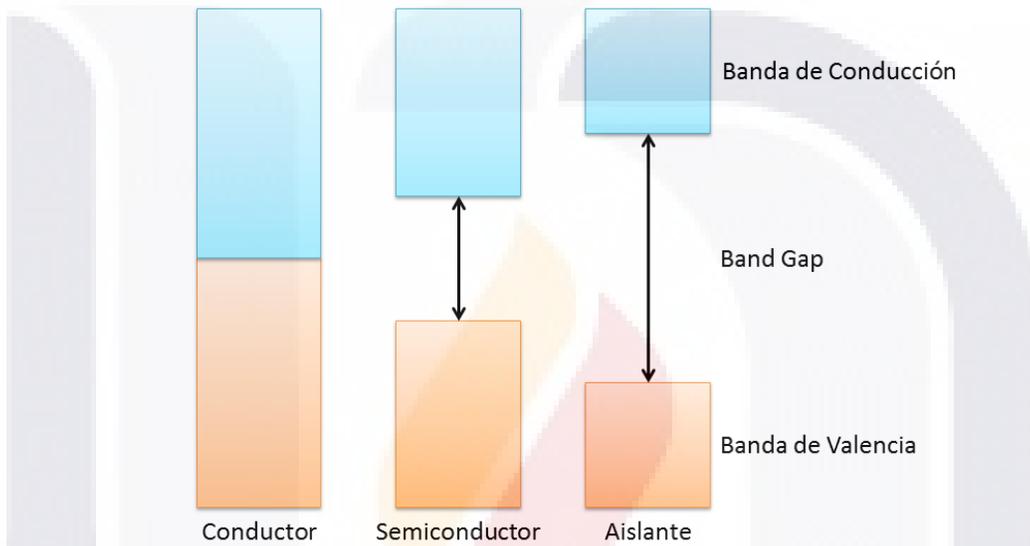


Figura 6. Esquema de ubicación de bandas para un metal, un semiconductor y un aislante. (Correa Zapata, 2014)

1.8.1. Dióxido de titanio

El TiO_2 es un óxido de marcado carácter iónico, por lo que se puede considerar que está formado por iones Ti^{4+} y O^{2-} ; existe en varias formas alotrópicas neutras (anatasa, rutilo, brookita) (**Figura 7**). El rutilo es el polimorfo termodinámicamente estable a cualquier temperatura, aunque la formación de anatasa está favorecida cinéticamente a temperaturas inferiores a 600°C . La brookita es minoritaria y poco estudiada, sobre todo para aplicaciones fotocatalíticas. En la anatasa y en el rutilo los iones Ti^{4+} están rodeados, en su primera esfera de coordinación, por seis iones O^{2-} , en coordinación octaédrica distorsionada. En la anatasa las distancias Ti-Ti son

más largas que en el rutilo, mientras que las Ti-O son menores. Ambas estructuras cristalinas difieren en la ordenación de los octaedros TiO_6 .

La anatasa es la que suele presentar mejor eficiencia fotocatalítica, a pesar del menor ancho de banda del rutilo. Se han postulado varias teorías para eso, como la mayor estabilidad de los hidroxilos adsorbidos sobre la superficie del Rutilo, que dificulta la formación de OH y/o la mejor separación de cargas en la anatasa, debido a la reducción del oxígeno y de Ti^{4+} a Ti^{3+} por los electrones foto generados.

La utilización de NP's de TiO_2 es ventajosa desde el punto de vista de la catálisis. El motivo principal parece ser el incremento de la superficie específica con la disminución de tamaños de partícula y la consiguiente mayor proporción de átomos en posiciones superficiales, donde se hallan los sitios activos. El aumento del ancho de banda que se produce a escala nanométrica en los semiconductores, es conocido como *Quantum Size Effect* (efectos inducidos por la nano-estructura) (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006), lo que implica en la formación del par electrón-hueco.

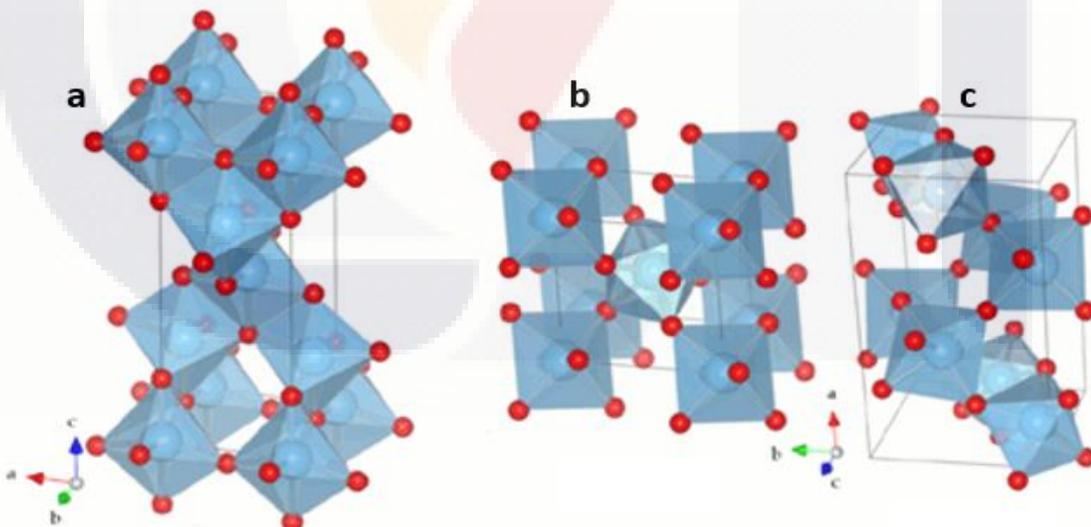


Figura 7. Estructuras cristalinas del dióxido de titanio, a) Anatasa, b) rutilo y c) brookita. (PRIETO MAHANEY, 2015)

El TiO_2 debe ser irradiado con luz UV para ser activado debido a su amplia banda prohibida (3.2 eV), con una energía mayor que la energía de

brecha de la banda de valencia y la banda de conducción se logra proporcionar al catalizador energía suficiente para ser activado, entonces el electrón en la banda de valencia podría promoverse a la banda de conducción, dejando el hueco, éste reacciona con las moléculas de agua circundantes para producir radicales OH^\bullet , mientras que los electrones en la banda de conducción reaccionan con el oxígeno para producir radicales superóxido (O_2^\bullet). Estas especies radicales participan en reacciones de oxidación, para atacar componentes orgánicos vitales de mo' s tales como las membranas celulares, ARN, ADN, proteínas y lípidos, que resulta en la muerte de los mo' s (Thanh Dong & Byeong Kyu, 2014).

Entonces, una partícula semiconductora será el catalizador ideal para una reacción determinada solo si los productos se forman con una elevada especificidad, permanece inalterada durante el proceso, si se requiere la formación de pares electrón-hueco y no se almacena energía en los productos finales, siendo exotérmica y cinéticamente retardada (Garcés Giraldo, Mejía Franco, & Santamaría Arango, 2003).

1.8.2. Dopaje de TiO_2

Debido a que la banda prohibida del TiO_2 requiere menos de 380 nm para activar el proceso foto-cataítico, la técnica de dopaje pretende modificar las propiedades eléctricas de TiO_2 para reducir la brecha de banda prohibida y favorecer la formación del par electrón-hueco bajo irradiación de luz visible, uno de los objetivos es favorecer la separación de cargas y la eficiencia del proceso. Con la acumulación de electrones se puede incrementar la velocidad de reducción de oxígeno, los cationes metálicos pueden actuar como intermediarios en la transferencia de carga o bien como centro de recombinación, dependiendo de su concentración, configuración electrónica y distribución en el material. Con el uso de metales de transición como dopantes, se logra desplazar la absorción del semiconductor a la región visible, los metales suelen ser muy usados debido a que actúan como aceptores de electrones y minimizan la recombinación de las cargas

generadas. Sin embargo, cuando se excede la cantidad optima, pueden actuar como sitios de recombinación de cargas, provocando la disminución de la actividad catalítica (Torres & Ruiz, 2011).

1.8.3. Cobre

El cobre es conocido desde la más remota antigüedad. Su uso a nivel médico se cita en el *Papiro de Smith*, texto médico egipcio escrito entre 2600 y 2200 a.C. donde describe su aplicación para tratar heridas en el pecho y desinfectar el agua. Se ha estudiado el cobre y plata para la reducción de infecciones en ámbitos hospitalarios, sugiriendo que en superficies tienen mejor actividad antimicrobiana (Domínguez, et al., 2012). Sin embargo, la actividad antimicrobiana no está totalmente dilucidada. Algunos trabajos sugieren que cuando la superficie de cobre entra en contacto con un patógeno, la membrana externa de la bacteria literalmente, se rompe, y a su vez pierde nutrientes necesarios para su supervivencia y, en consecuencia, se produce un debilitamiento general que acaba con la destrucción final. El cobre además impide que se produzcan las reacciones bioquímicas necesarias para que una bacteria sobreviva, es decir, no puede "respirar, ni comer, ni crear energía".

Otros trabajos sugieren que el cobre tiene un elemento crucial en la actividad antibacteriana, la capacidad del cobre para ceder y aceptar electrones en un proceso continuo. Entonces en concentraciones elevadas, tiene un efecto tóxico sobre las bacterias debido a la liberación de radicales de hidróperóxido, los iones de Cu podrían sustituir iones esenciales para el metabolismo bacteriano como el hierro, interfiriendo inicialmente con la función de la membrana celular y luego a nivel del citoplasma alterando la síntesis proteica, ya sea inhibiendo la formación de proteínas o provocando la síntesis de proteínas disfuncionales, alterando la actividad de enzimas esenciales para el metabolismo bacteriano (Prado, Vidal, & Durán , 2012).

1.9. Síntesis de materiales nanoestructurados

Para la síntesis de materiales de tamaño nanométrico se conocen principalmente dos mecanismos bien diferenciados: *top-down* y *bottom-up*; los primeros por medio de métodos físicos y los últimos por métodos químicos (Pedroza Vera, 2014).

Los métodos *top-down* se usan para la obtención de materiales metálicos y cerámicos, entre los que se encuentran: Métodos de fabricación por energía mecánica (cortado, laminado, mecanizado, compactado, molienda y atomización), métodos de fabricación térmicos (sin un cambio químico en la muestra, evaporación, extrusión, sublimación, combustión, entre otros), métodos de fabricación de alta energía (arcos eléctricos, láser, haz de electrones y plasma, evaporación de haz de electrones, entre otros).

Los métodos *bottom-up* son ampliamente usados para sistemas metálicos y óxidos metálicos, se clasifican en cuatro principales categorías por métodos: en fase gaseosa (homogéneas o heterogéneas), en fase líquida, en fase sólida y biológicos. Entre los métodos más comunes para la síntesis de materiales nano estructurados se encuentran la co-precipitación, sol-gel, depósito químico en fase vapor, reducción de sales metálicas, hidrotermal y micro emulsiones (Valencia Barrón, 2013).

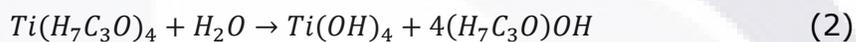
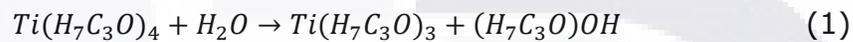
1.9.1. Síntesis por SOL-GEL

El método de sol-gel es una técnica que fue desarrollada hace más de 40 años, es considerado dentro de los llamados procedimientos suaves de síntesis. Este proceso era utilizado en un principio para la producción de sólidos, vidrio, fibras, espejos, etc., sin embargo, con el tiempo se mejoró para la obtención de partículas de tamaño nanométrico.

El método se basa en la formación de redes de elementos inorgánicos, las cuales son obtenidas por dos reacciones simultáneas, el hidrólisis y la condensación, utilizando como precursores una solución de alcóxidos, un solvente, agua y un catalizador (Ramírez Palma, Huirache Acuña, Espinosa

Acosta, & Hernández Padrón, 2009). Existen dos grupos principales de precursores, tales como: sales metálicas y alcóxidos.

En el proceso de hidrólisis un ion hidroxilo es capaz de adjuntarse a un átomo metálico (isopropoxido de titanio) (1). Dependiendo de la cantidad de agua, la hidrólisis puede llegar a terminarse, para el caso del titano o detenerse mientras el metal esta solo parcialmente hidrolizado (2). En esta etapa se obtienen soles, es decir, una suspensión de aspecto similar a una disolución, que contiene partículas de tamaños inferiores a 100nm.



En la condensación las partículas coloidales se forman por aglomeración de las especies disueltas. Las reacciones producidas por colisiones de las partículas nucleofílicas; el sustituyente más negativo es el centro y el sustituyente con la mayor carga positiva es el grupo desplazado, así, se van formando estructuras tridimensionales unidas por enlaces.



El gel finalmente consiste de una red sólida rodeada de una fase líquida continua, la continuidad de la estructura sólida da elasticidad al gel. La estructuración del gel se muestra en la **Figura 8** donde la red puede resultar de la desestabilización de las partículas del sol por repulsión de dos capas de una barrera esférica, o puede ser construida por entrelazamientos de varios agregados, el sólido cristalino formado tendrá una energía libre menor que el gel a partir del cual se forma, una vez que inicia el proceso, este continúa hasta la desaparición del gel (García hernández, 2009).

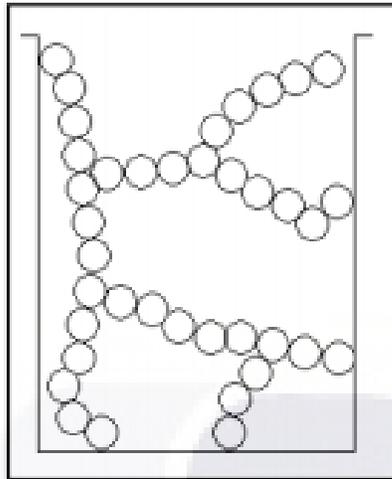


Figura 8. Esquema de un gel, red sólida embebida en una fase líquida.

El agua y el alcohol son removidos a temperatura moderada menor a 100°C, quedando el óxido metálico con residuos orgánicos, el producto secado es llamado xerogel (condiciones normales) y aerogel (condiciones supercríticas). El tratamiento se lleva a cabo a 400°C–800°C con el fin de eliminar residuos orgánicos y agua para obtener un óxido metálico cristalino.

1.10. Caracterización de las nanopartículas

El análisis de los nanomateriales incluye la caracterización de sus propiedades (sean químicas, mecánicas, electrónicas, ópticas o magnéticas), y el estudio de la interacción que tienen con otras nano estructuras, con ondas electromagnéticas, con medios biológicos, etc. Los parámetros a considerar para la caracterización son: el tamaño de las partículas, estado de aglomeración, forma, dureza, densidad, peso molecular, aspecto, estructura cristalina, solubilidad, composición, área superficial, estabilidad y configuración geométrica. El tamaño y la composición química dan a los materiales propiedades particulares.

1.10.1. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es el mejor método adaptado al estudio de la morfología de las superficies. A diferencia de un

microscopio óptico, el cual utiliza fotones del espectro visible, la imagen generada por SEM utiliza un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra. La SEM es particularmente útil en el análisis de materiales para observar las superficies fracturadas de los metales, las muestras suelen estar recubiertas de oro u otros metales pesados para aumentar la resolución y calidad de la señal. Además, puede obtenerse información cualitativa y cuantitativa en relación con la composición de la muestra cuando está equipado con espectrofotómetro.

La técnica se fundamenta en la producción de imágenes a través de electrones, con radiaciones emitidas o reflejadas del mismo lado donde recibe el haz electrónico, donde se observa la superficie de un objeto opaco al haz, que lo hace comparable al microscopio de luz electrónico o de disección. Además, con un detector adecuado se puede formar una imagen empleando los rayos emitidos, usando el mismo principio de formación de imagen. La imagen final entonces será un mapa de distribución elemental en la cual el contraste reflejará la concentración del elemento (Balú, 2012).

Entonces, el material a observar debe ser recubierto de un metal pesado como el oro, el haz de electrones barre la superficie de la muestra y los electrones desviados por la capa de metal se recogen y proyectan sobre una pantalla para producir la imagen, donde se pueden observar las muestras de cierto tamaño y la profundidad de campo, además, entre sus aplicaciones esta la formación de imágenes tridimensionales y el examen de superficies (Madigan, Martinko, Dunlap, & Clark, 2009). La resolución de la mayoría de los instrumentos es alrededor de 5 nm con amplio intervalo de amplificación. Los electrones con ángulo pequeño interactúan con las protuberancias de la muestra generando una dispersión de electrones secundarios produciendo una señal electrónica que genera una imagen con una profundidad de campo aproximadamente 300 veces superior al microscopio óptico. (Smith & Hashemi, 2014).

1.11. Material de soporte

Debido a la necesidad de manipular el material nano estructurado con mayor facilidad, se busca un material de soporte que cumpla con ciertas características para brindar una mayor eficiencia en un proceso foto-catalítico. El material de soporte será entonces un sistema utilizado como vehículo para detener las nanopartículas sintetizadas.

Los materiales porosos son de alto interés en diversas aplicaciones, desde la adsorción, detección y separación, hasta la catálisis y biotecnología, debido a su elevada área superficial, tamaño de poro, estructura modificable y propiedades superficiales. Las áreas superficiales pueden alcanzar valores de hasta varios miles de metros cuadrados por gramo, dependiendo del material. Estos materiales consisten habitualmente en matrices de carbono o compuestos inorgánicos (tales como sílice, zeolitas, óxidos metálicos, etc.) u orgánicos (polímeros, geles de carbono, etc.) (Balú, 2012).

Se puede clasificar un buen material de soporte en foto-catálisis, como aquel material que sea estable, presente porosidad para incrementar el área superficial, sea inerte o favorezca la reacción y de fácil manejar.

La perlita es una roca volcánica (**Figura 9**), vítrea, que contiene agua de cristalización en su molécula, este mineral, se calienta a 1200°C en hornos especiales, donde el agua ocluida se transforma en vapor hasta constituir un grano muy ligero, formado por microceldas cerradas y vacías, aumentando su volumen hasta 20 veces.

La perlita expandida tiene una densidad media alrededor de 130 kg/m³ y una conductividad térmica de alrededor de 0.04 Kcal/m·h·°C. Las partículas, cuya forma es granular, se expanden como consecuencia de la volatilización de agua ligada y la formación de vidrio natural.

Las propiedades principales de este material que lo hacen ser un buen material de soporte es que no es tóxico, es imputrescible, es incombustible, químicamente inerte, además de que es ligero y económico.



Figura 9. Representación de los sólidos cristalinos microporosos (perlita)

El análisis químico es 71 – 75% SiO_2 , 12.5 – 18% Al_2O_3 , 4 – 5% K_2O , 1–4% sodio, óxidos de calcio, y rastros de óxidos de estos metales. También contiene de 2 – 5% de agua combinada que permite expandir la perlita calentándola, proceso que crea un material muy liviano (Arambarri & Aglietti, 2000).

1.12. Reactores

Un reactor se define como un recipiente donde se llevan a cabo procesos de transformación, debe ser diseñado y construido de tal forma y naturaleza que no se involucre en la reacción química. Existe una gran variedad de reactores, los cuales son clasificados según el tamaño, la forma y las condiciones de operación que este involucra. El diseño de los reactores debe considerar el objetivo principal que se persigue, es decir, debe basarse en las condiciones óptimas deseadas para la reacción, tales como, las fases de reacción, la velocidad y el tiempo de reacción. Para que una reacción se desarrolle con el mejor grado y velocidad conforme a los objetivos, los reactores deben procurar el contacto más favorable entre los reactivos, el catalizador debe mantener este contacto durante un tiempo óptimo, alcanzar y controlar las condiciones como temperatura, presión y composición, en función de la cinética de las reacciones intervinientes (Muñoz Camacho & Grau Rios, 2013).

Los reactores químicos son clasificados típicamente según la dinámica del flujo, la geometría, la fase presente y el régimen térmico. Según el primer

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

criterio, la dinámica de flujo, se pueden encontrar reactores continuos y reactores discontinuos, los cuales puede ser por cargas o ininterrumpido, respectivamente. El segundo criterio, la geometría, indica la clasificación en Tanques agitados (que pueden ser operaciones discontinuas "Batch" o Continuas "CSTR") y Reactores tubulares (normalmente, operaciones continuas). El tercer criterio, pueden ser Homogéneos, los reactivos de interés y el catalizador se encuentran en la misma fase, y Heterogéneos, donde el diseño involucra la presencia de dos o más fases.

Para el diseño de un reactor, las condiciones que se deben seguir para un modelo específico, desde el punto de vista de ingeniería son que constituya la representación más próxima al proceso real y que pueda emplearse sin excesiva complicación matemática; resulta poco útil un modelo que se aproxime mucho a la realidad pero que sea muy complicado que resulte inaplicable (Levenspiel, 1991).

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de la tecnología enfocada a la desinfección de aire ha sido investigado en los últimos años, debido al gran incremento de contaminantes que son arrojados al ambiente y que afectan la salud de los seres vivos, dichos contaminantes pueden ser desde mo's patógenos hasta compuestos químicos, en especial compuestos orgánicos volátiles (COV's), además de que este tipo de contaminantes se encuentran comúnmente en espacios cerrados. Acerca del estudio de la descontaminación o purificación de aire en espacios cerrados se encuentran filtros, lámparas UV, procesos químicos complejos, entre muchas otras tecnologías que se han desarrollado.

Para lograr la desinfección del aire, los efectos antibacterianos de diversos materiales han sido reportados, en salas hospitalarias han sido principalmente usados diversos materiales en superficies, donde se han aplicado recubrimientos de metales en forma atómica o como recubrimientos en forma de NP's, estos metales tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de mo's, y disminuir la probabilidad de desarrollo de resistencia. El uso de diversos materiales ha sido reportado por varios autores utilizando los criterios de las Entidades Promotoras de Salud, indican que el cobre en superficies y sus aleaciones son capaces de eliminar en horas hasta el 99,9% de bacterias patógenas, bacterias tales como, *S. aureus*, *E. coli*, (Alves Ribeiro, Matos Cruz, Nallin Montagnolli, Dino Bidoia, & Matos Lopes, 2015), *P. aeruginosa*, *Enterobacter aerogenes*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella entérica*, *Campylobacter jejuni*, *Legionella pneumophila*, *Clostridium difficile* y *M. tuberculosis* (Prado, Vidal, & Durán, 2012).

Conocido el efecto microbicida de la foto-catálisis, el uso de NP's de TiO_2 ha tenido gran interés en los últimos años, debido a los diversos mecanismos de inhibición, con los cuales disminuye la probabilidad de resistencia a este tratamiento. Pocos reportes existen sobre el uso de TiO_2 dopado para implementar la desinfección de aire.

Dentro de los avances en la tecnología para la desinfección de aire y tratamiento de compuestos orgánicos, una de las primeras investigaciones corresponde a Goswami *et al*, (1995) el cual desarrolló una instalación de contactos de recirculación para inactivar contaminantes biológicos. Algunos reportes se han enfocado a soportar las NP's para aplicarlas en el diseño de un filtro y evaluar la actividad microbicida en bacterias aerotransportadas. El TiO₂@fibra de vidrio ha reportado tener actividad microbicida gradual frente a bacterias tales como, *S. aureus* meticilinresistente, *Enterococcus faecalis* vancomicina resistente, *Streptococcus pneumoniae* penicilino resistente, *Escherichia coli* y *P. aeruginosa* multidrogo resistente (Nakano, et al., 2013).

Otros autores han evaluado el poliéster como material de soporte del TiO₂, para el diseño de un fotorreactor activado con una lámpara germicida de 30W, la eficiencia del proceso fue evaluada para la eliminación de hongos y bacterias en un cuarto cerrado de 67m³. La eficiencia fotocatalítica del reactor se evaluó en función de la disminución de la densidad microbiana, para la cual se reportó que el prototipo es eficiente para la eliminación de ambos mo's modelo, bacterias y hongos (Paschoalino & Jardim, 2008). Kondo, *et al* (2003) investigó un sistema para inactivar mo's en el aire, para lo cual utilizó un reactor de flujo continuo empleando TiO₂ p-25 como catalizador, en el diseño experimental se logró inhibir el 99% de los mo's al irradiar con luz UV. No se realizaron muestreos de aire interior para verificar la eficiencia del reactor diseñado.

Algunos reportes de estudios fotocatalíticos para observar los efectos microbicidas de las NP's dopadas, en algunos se ha evaluado el efecto de la irradiación con luz visible y en oscuridad. Yadav, *et al* (2014) logró inhibir completamente el crecimiento de *E. coli* y *S. aureus* utilizando NP's de TiO₂-Cu²⁺ (8-12 nm) bajo 240 min de irradiación con luz visible, estudiaron los efectos en oscuridad donde no encontraron efectos inhibitorios, concluyendo que el material no es activo en estas condiciones, además, para observar los efectos de la concentración del dopante sintetizaron a 1 y 3% de dopante, sugiriendo según los resultados que el efecto inhibitorio se ve afectado disminuyendo el tiempo de inhibición total a mayor concentración.

Algunos otros dopantes han sido usados para el TiO_2 , sido evaluados con el mismo objetivo de desinfección de aire, tal es el caso de el $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ (1%) el cual fue soportado en fibra de vidrio, con el cual se logró evaluar la actividad fotocatalítica en la inhibición de bacterias, reflejándose esto en una disminución considerable de la carga bacteriana total en un flujo de aire (Muñoz, 2011); otro estudio con resultados similares fueron reportados para filtros que usaban perlita como material poroso para soportar las NP's sintetizadas (Pedroza Vera, 2014).

Por otro lado, también se han desarrollado equipos de filtración con el fin de degradar COV's, para ello, diversos grupos de investigación han diseñado varios modelos de reactores con actividad fotocatalítica. Bum Kim, *et al.* (2002) diseñaron un foto-reactor tipo batch, utilizando TiO_2 como fotocatalizador para la degradación de COV's, como tricloroetileno, acetona, metanol y tolueno, donde estudiaron cómo es que influyen las variables de reacción, tales como el vapor de agua, el oxígeno y la temperatura en la degradación fotocatalítica del compuesto, observando que la humedad y el tiempo de reacción es más eficiente el proceso con una mayor degradación, la presencia de oxígeno ayuda a producir mayor cantidad de ROS y así incrementa la degradación de COV's.

Suligoj, *et al.* (2016) diseñaron un foto-reactor batch, utilizando nanocompositos de $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ para la descomposición de COV's, donde las propiedades fotocatalíticas fueron evaluadas en la oxidación de tolueno y formaldehído, con ayuda de un cromatógrafo de gases y un medidor de formaldehído, respectivamente. Los resultados mostraron que logró la oxidación completa de tolueno, y 91% de descomposición de formaldehído a las 5 horas de irradiación con luz UV-vis, los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente, con las mismas condiciones para ambos contaminantes, el material se soportó al interior del reactor en vidrio.

Un reactor de flujo continuo, fue diseñado por Hinojosa-Reyes *et al.* (2013) para estudiar la descomposición fotocatalítica en fase gas de etilbenceno, empleando perlititas granulares impregnadas de TiO_2 , como

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

catalizador, el TiO_2 fue dopado con Indio para evaluar la actividad fotocatalítica en la descomposición de etil-benceno en flujo de aire húmedo continuo, lograron concluir que el soportar el TiO_2 permite en forma practica la descomposición de COV's en una corriente de aire. Ming J. *et al* (2011) diseñaron un prototipo de reactor con TiO_2 dopado con W, prepararon fotocatalizadores con varias cantidades de tungsteno para observar el efecto del dopante, en la descomposición fotocatalítica de acetona para lo cual emplearon un cromatógrafo de gases para medir la concentración de acetona y CO_2 en el interior del reactor, los experimentos se llevaron a cabo con 60 min de oscuridad y 80 min de irradiación con luz UV. En oscuridad observaron la adsorción de la acetona en el catalizador la cual aumento según la cantidad de tungsteno presente, en irradiación se observó la degradación de acetona, la cual aumento según la cantidad de dopaje inclusive en el tiempo de oscuridad, concluyen que el W^{6+} puede ser fácilmente reducido a W^{5+} durante el proceso, por lo que ayuda al atraimiento de los electrones foto generados, limitando la recombinación.

Utilizando el mismo catalizador, dopado con cobre, Martínez Vargas, *et al*. (2015) demostraron la degradación total de tricloroetileno en un reactor de flujo continuo con $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$, las NP's fueron soportadas en tubos de cuarzo, y los parámetros para la fotocatalisis fueron controlados, el flujo de aire, la humedad y la temperatura. De la misma manera que otros autores sintetizaron catalizadores con distintas concentraciones de dopante y según sus resultados observaron que no siempre es favorable una cantidad alta de dopante, debido a que se pueden bloquear los sitios activos del catalizador.

Otros materiales probados para la desinfección de aire se encuentra el uso de zirconio dopante de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ($\text{Zr}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$), evaluado en un foto-reactor con placas de vidrio como soporte del catalizador, se evaluó temperatura ambiente, la degradación de Tolueno y Xileno, bajo irradiación de luz UV y luz visible, y variando la superficie de contacto, logrando evaluar que a mayor área se incrementa la actividad fotocatalítica logrando con luz UV el 82% y 100% de tolueno y xileno, respectivamente, mientras que en luz visible el 30% y 68% (Chan-Soo, *et al.*, 2012).

Algunos grupos de investigación se han encargado de estudiar cómo influyen los diferentes parámetros de reacción, tales como temperatura, flujo, humedad e iluminación, en la degradación fotocatalítica de diversos compuestos orgánicos. El TiO_2 es uno de los fotocatalizadores más usados en la actualidad, se ha comprobado que el dopaje aumenta la actividad fotocatalítica. La humedad afecta significativamente la actividad catalítica porque facilita la producción de radicales OH, depende también de la iluminación dependiendo de la luz utilizada, UV o visible (Wang, Ang, & Tade, 2007).



3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se ha presentado como foco de atención el problema de contaminación de aire, el cual ha sido originado por la gran cantidad de sustancias de uso diario que son arrojadas a la atmosfera, como, el smog, el humo de cigarro, los COV's, y muchos más. Por lo tanto, se considera que todas estas sustancias no son naturales y pueden dañar el ecosistema, causando daños de manera directa o indirecta a los seres vivos, incluidos los seres humanos.

Es de interés específico, la calidad del aire interior en los hospitales ya que el ambiente de estos establecimientos se encuentra frecuentemente contaminado con patógenos de alto riesgo, provocando las conocidas IN; además de sustancias volátiles causantes de una gran variedad de sintomatología de malestar a los paciente o profesionales de la salud.

Existen una gran variedad de bacterias que presentan importancia intrahospitalaria, debido a que son organismos que pueden ser aerotranportados y que, además, presentan resistencia a una gran variedad de antibióticos. Entre estos mo's se encuentran, *E. coli*, *S. aureus*, *P. aereuginosa*, *K pneumoniae*, entre otras, bacterias que pueden llegar a ser un problema grave debido a las consecuencias que conlleva un paciente si es infectado, ya sea intervenido quirúrgicamente o inmunocomprometido.

Los procesos de oxidación avanzada resultan ser una opción para la descontaminación y purificación de aire, específicamente el uso de la fotocatalisis que es utilizada como un sistema para la degradación de compuestos orgánicos, tales como, los COV's y los mo's.

Debido a la eficiencia fotocatalítica del TiO_2 , la cual ha sido ampliamente explorada como alternativa para el tratamiento de contaminación, se centra el interés en este compuesto para la desinfección y purificación de aire. El objetivo principal que se busca con la foto-catálisis es la mineralización de todos estos compuestos orgánicos para así obtener una cantidad mínima o nula de residuos o metabolitos secundarios.

Se sabe que el TiO_2 tiene actividad fotocatalítica bajo luz UV, además de que el dopaje con metales de transición tiende a aumentar tal eficiencia, debido a que provoca una disminución en el ancho de banda prohibida siendo necesaria una menor cantidad de energía para la formación del par electrón-hueco, entonces el material podrá tener actividad fotocatalítica al ser irradiado con luz visible. Existen varios estudios de dopaje con Ag y su actividad en fotocatalisis, hay poca información acerca del uso del cobre como dopante, pero se sabe que tiene, por sí solo, actividad microbicida, no es tóxico para mamíferos, y es un buen aceptor y donador de electrones en un proceso continuo. Por este motivo, en este trabajo se evaluará la acción microbicida del $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita para el tratamiento de aire de hospitales.

4. HIPÓTESIS

El nanocomposito de dióxido de titanio dopado con cobre soportado en perlita ($\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}\text{@perlita}$) mostrará eficiente actividad fotocatalítica en la desinfección de aire debido a la acción sinérgica de TiO_2 (oxidante), y de Cu^{2+} (microbicida) y además de capacidad de adsorción del soporte (perlita).

5. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la actividad microbicida de dióxido de titanio dopado con cobre (+2) soportado en perlita ($\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}\text{@perlita}$) en la desinfección de aire de interiores (hospitales). Diseñar y construir un prototipo de filtro de aire con actividad microbicida.

6. OBJETIVOS PARTICULARES

- ✚ Optimizar variables de reacción para la síntesis de materiales soportados de tipo $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}\text{@perlita}$.
- ✚ Caracterización de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}\text{@perlita}$ mediante microscopia electrónica.
- ✚ Evaluar la actividad foto-catalítica de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ en la desinfección de aire.
- ✚ Determinar la eficiencia del proceso foto-catalítico mediante técnicas microbiológicas.
- ✚ Diseñar y construir un prototipo de filtro de aire.
- ✚ Optimizar los diferentes parámetros del proceso foto-catalítico (flujo de aire, tiempo de reacción, humedad, iluminación) para la desinfección de aire (hospitales).
- ✚ Evaluar la eficiencia foto-catalítica del proceso.

7. METODOLOGÍA

7.1. Síntesis del fotocatalizador. Se llevo a cabo una síntesis de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ por el método de sol-gel, para lo cual se pesaron 88.7 mg de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), se disolvieron en 10 mL de ácido acético glacial manteniéndose agitación constante. Una vez disuelto completamente, se procedió a agregar isopropoxido de titanio IV ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$), de manera lenta para evitar la hidrólisis. Por otro lado, en un matraz de 125 mL se disolvieron 0.9 g de goma arabiga en 30 mL de agua desionizada, con agitación por 30 min a 60°C . El contenido del segundo matraz se refrigeró por 3 min, para bajar la temperatura y posteriormente agregar, por goteo al primer matraz, sin detener la agitación, hasta la formación del coloide. Uno de los colides se llevó a sequedad para la obtención de polvos para su caracterización, se eliminó el exceso de agua usando parrilla, una vez seco, se calcinó en Mufla (FELISA, FE-340, México) a 350°C por 3 horas.

7.2. Soporte de perlita. Para soportar el material se realizó el pesaje de la perlita, la cual fue previamente tamizada para seleccionar las perlitas de mayor tamaño. Se lavaron con ácido clorhídrico (HCl) al 1%, dejando en ebullición por 20 min, se dejaron enfriar, para despues lavar perfectamente con agua (aproximandamente 3 lavados). 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). Inmediatamente, se impregnaron de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%), por el método de inmersión, luego se centrifugaron (cintrífuga UNICO PowerSpintmHX centrifugue C822) a 3400 rpm durante 2 min para retirar el material no adherido en la perlita. Se calcinaron en Mufla (FELISA, FE-340, México) durante 3 horas a 350°C . Los pasos de impregnación y calcinado se repitieron cinco ocasiones, para otener cinco capas de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%). Las perlitas, una vez impregnadas, fueron almacenadas en frascos ambar a temperatura ambiente hasta su uso.

7.3. Caracterización del fotocatalizador. El material sintetizado tanto de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ en polvo y de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita se analizó mediante SEM, para identificar la morfología, tamaño y distribución de las NP's sintetizadas. Para el análisis, las NP's en forma de polvo fueron previamente sonicadas (BRANSONIC-2510R, Estado Unidos) para evitar la aglomeración, de las NP's soportadas se seleccionaron perlitas que presentaran la forma mas plana posible, para facilitar el análisis. Las muestras se impregnaron de oro y fueron analizadas a diferentes aumentos con Microscopio de Barrido Electrónico (JOEL, 7600f) acoplado a equipo de análisis elemental (OXFORD INCA), siguiendo el metodo SAF. Centro de Ciencias Basicas de la Universidad Autonoma de Aguascalientes.

7.4. Prototipo de filtro de aire. Se diseño un prototipo de filtro de aire utilizando un cilindro de vidrio transparente (Chromaflex) de 50 cm de altura y 2.5 cm de diámetro, en su interior se colocó el $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita al 80% de su capacidad, los extremos fueron asegurados con algodón. El extremo inferior se conecto al impactador de cascada de Andersen para la toma de muestras bacterianas presentes en el aire.



Figura 10. Prototipo diseñado del filtro de aire para el muestreo de aire de hospitales.

7.5. Muestreo en salas de hospitales. El muestreo del aire de las salas de hospitales se llevó a cabo por el método de impactación utilizando el impactador de cascada Andersen para partículas viables de seis niveles (Thermo Scientific™), muestreador multi-orificio usado para determinar el número de partículas viables de bioaerosoles o aerosoles microbianos, con una bomba de vacío en funcionamiento continuo que proporciona un caudal de aire constante de 28.3 L/min.

El muestreo se realizó en tres clínicas de una unidad hospitalaria de estomatología (clínica 1, clínica 2 y clínica 3 respectivamente). Una prueba preliminar se llevó a cabo con el fin de determinar la carga microbiana total de aire e identificar algunas bacterias de importancia. Para esta prueba se colocaron cajas petri de agar Mueller Hinton en los niveles 1 y 6 del impactador, los tiempos de muestreo se realizaron en periodos de 10 y/o 15 min para determinar el tiempo óptimo. Previo a cada muestreo el impactador fue sanitizado con etanol 70% para evitar una contaminación externa al muestreo. Todos los muestreos se realizaron al centro de cada clínica hospitalaria, cuando estas se encontraban en funcionamiento, con un flujo de 25 a 30 personas, entre pacientes y médicos. Las cajas Petri se retiraron del impactador pasado el tiempo de muestreo, luego fueron incubadas en laboratorio por un periodo 24 horas a 37 °C para permitir el crecimiento de las bacterias impactadas en el medio, y al termino de este tiempo se realizó el conteo de las colonias, las cuales fueron reportadas como UFC/m³. Una segunda prueba se realizó utilizando las condiciones óptimas para el muestreo, con un tiempo de 15 min (caudal de 424.5 L/min). En esta prueba, se colocaron cajas Petri con medio Mueller Hinton, en los 6 niveles del impactador, con el fin de separar las bacterias viables, como bacterias no respirables y bacterias respirables. Todos los muestreos realizados consistieron de dos etapas, en la primera etapa solo se colocó el impactador para determinar los mo's en el ambiente; en la segunda etapa el filtro empacado con TiO₂-Cu²⁺@perlita fue conectado al impactador, con el fin de determinar la eficiencia fotocatalítica en la inhibición del crecimiento de mo's.

7.6. Aislamiento de bacterias. Del crecimiento microbiano obtenido en las cajas con agar Mueller Hinton de la prueba preliminar, se seleccionaron algunas colonias al azar para proceder al aislamiento e identificación de bacterias impactadas. Para el aislamiento se tomaron las colonias con asa bacteriológica y fueron inoculadas en agar ICC durante 24 horas a 37°C, posteriormente se sembraron usando dilución por estría para

aislar la bacteria, además de utilizar medios selectivos/diferenciales como Sal y Manitol y MacConkey, para bacterias Gram-positivas, *Staphylococcus* sp., y bacterias Gram-negativas, *Escherichia coli*, respectivamente. Una vez aisladas, se realizó la purificación y luego la identificación de las bacterias mediante pruebas bioquímicas recomendadas para cada una de ellas. Las bacterias se conservaron en agar Infusión Cerebro Corazón mantenidas en refrigeración, para poder ser utilizadas en las pruebas de inhibición.

7.7. Pruebas de inhibición bacteriana. Para llevar a cabo las pruebas de inhibición bacteriana con el $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita, se utilizaron bacterias aisladas en las áreas de muestreo. La bacteria se reactivó haciéndola crecer durante 18 horas en 3 mL de medio ICC a 37°C; pasado el tiempo, se separó y eliminó el medio por centrifugación 3,500 rpm por 5 min, el pellet obtenido se resuspendió en buffer de fosfatos (pH=7, 1.05 gr K_2HPO_4 y 1.7 gr NaH_2PO_4). Luego la suspensión bacteriana se ajustó a una densidad óptica (DO) siguiendo la escala de McFarland con un espectrofotómetro UV-Vis (Helios Omega), siendo para *S. aureus* de 0.5 leída a 465 nm y para *E. coli* de 0.015 leída a 560 nm. Una vez ajustada la suspensión, se realizaron diluciones para obtener inóculos de 1×10^{-4} UFC/mL.

Los ensayos de inhibición se realizaron tanto en luz como en oscuridad, colocando cantidades diferentes en tubos estériles (**tabla 2**) de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita, donde fueron añadidos 5 mL de la suspensión bacteriana, que fueron incubados en baños maria con agitación y calentamiento (LAB COMPANION (BS-06), Korea) por 5 horas a una temperatura de 37°C.

Tabla 2. Concentraciones de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita para el efecto inhibitorio de las bacterias

Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
Sin perlitas	10 perlitas	10 perlitas	20 perlitas	30 perlitas
	sin $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$	con $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$	con $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$	con $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$

Para determinar la efectividad de la inhibición, del $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita sobre las bacterias, se inocularon 100 μL de cada tubo en medio selectivo para cada una de ellas (sal y manitol para *S. aureus* y MacConkey para *E. coli*), se dejaron en incubación a 37°C durante 12 y 18 horas respectivamente, al final se procedió a registrar las colonias encontradas en cada una de las cajas y se reportaron en UFC/mL.

7.8. Degradación de compuestos orgánicos volátiles. Para la degradación de COV se diseñó un reactor foto-catalítico, el diagrama de flujo se observa en la **figura 11**. El flujo principal fue regulado con las válvulas de entrada, donde se controló el tiempo de residencia del compuesto en el reactor. Se colocó una cámara de mezclado, donde se conectó una bomba de aire (Barnant company 400-3910) de 0.39 cfm (11 L/min), y una bomba de dosificación regulable (iwaki metering pump EZB11D1-VC, Japón) de 0.6 GPH para introducir el compuesto a degradar (alcohol). En la cámara de mezclado se controló la temperatura a 50°C para favorecer la formación del gas, el flujo de salida de la cámara se conectó a la entrada del reactor fotocatalítico empacado, el cual fue irradiado con luz visible. A la salida se colocó un refrigerante con el fin de condensar el gas generado y recuperarlo utilizando como solvente agua destilada. Los productos de foto-catálisis fueron analizados con el reactivo de Tollens para identificación de aldehídos, producto secundario de la oxidación de alcoholes primarios.

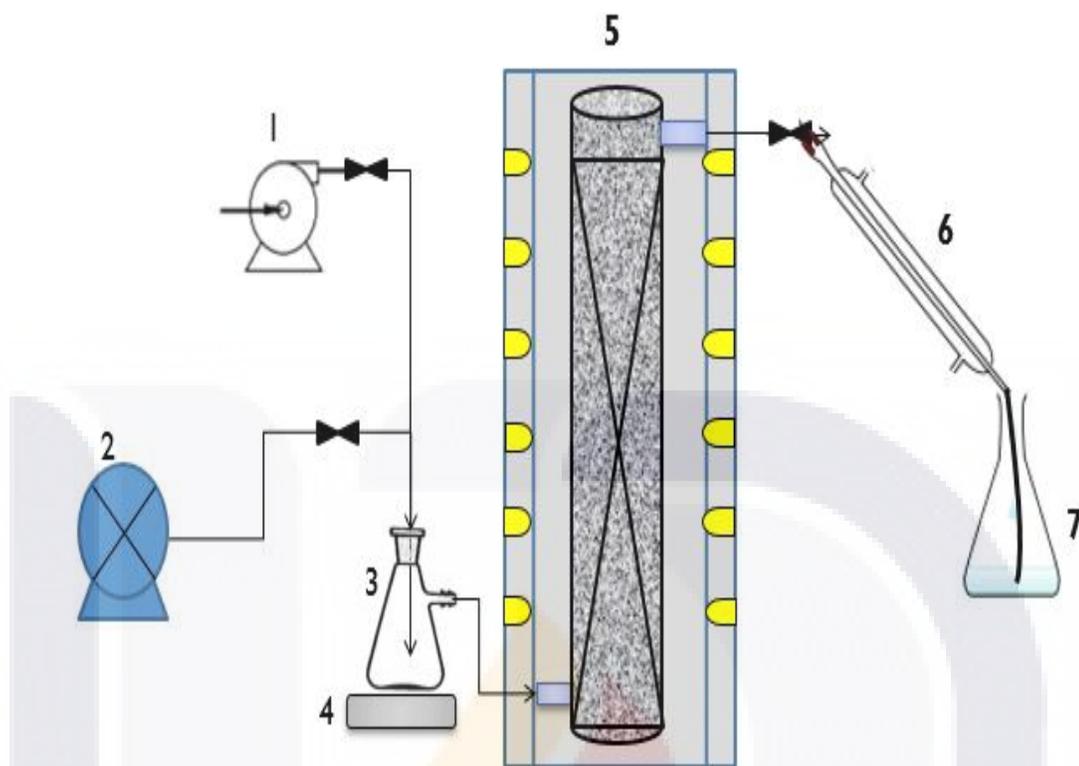


Figura 11. Diagrama de flujo de reactor foto-catalítico para la degradación de compuestos orgánicos volátiles. 1) Bomba de aire, 2) Bomba de dosificación, 3) Cámara de mezcla, 4) Parrilla de calentamiento, 5) Reactor foto-catalítico, 6) Refrigerante, 7) Recuperación de compuesto.

8. RESULTADOS

8.1. Síntesis de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita

El coloide de nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%) fue sintetizado por el método de sol-gel, siguiendo la metodología previamente establecida. Se obtuvieron polvos aparentemente muy finos, y estables al paso del tiempo a temperatura ambiente (**tabla 3**). Con los coloides sintetizados se realizó la técnica de inmersión para soportar las nanopartículas, utilizando perlita como material de soporte, las perlitas lavadas poseen un color blanco en su mayoría aunque algunas son de color café, una vez soportado el material, las perlitas adquirieron un color verdoso (**figura 12**), además por el incremento de peso que se observó en la perlita, se reporta que el peso total de nanopartículas impregnadas fue de 0.38g de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ por cada gramo de perlita utilizada.

Tabla 3. Características físicas del material sintetizado en forma de polvo y en forma soportada en la perlita.

	$\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$	Perlitas	$\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita
Color	Verde	Blanco	Verde
Apariencia	Polvo	Sólido	Adherido a la superficie
Estabilidad	Buena	Buena	Buena



Figura 12. Perlitas utilizadas para soportar las NP's de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%). **A)** Perlitas lavadas de color blanco sin NP's. **B)** Perlitas impregnadas con las NP's, de apariencia estable con cambio de coloración a verdoso.

8.2. Microscopía electrónica de barrido

Las nanopartículas fueron caracterizadas mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM), para observar la morfología, tamaño y distribución de las partículas tanto en forma de polvo como en las soportadas en las perlitas. En el análisis del polvo se logró observar que las NP's de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ poseen una forma esférica, estaban distribuidas de manera homogénea, con tamaños entre 50 y 100 nm (**Figura 13**). Para las soportadas, el análisis se realizó a varios aumentos, donde se lograron distinguir en las imágenes varios puntos distribuidos de manera homogénea sobre la perlita (**Figura 14-A**), capas rugosas a lo largo de la superficie (**Figura 14-B**), superficies lisas donde no se encuentra material adherido (**Figura 14-C**), formas esféricas de las NP's aglomeradas en la superficie, y pequeñas aglomeraciones en los poros que se lograron observar (**Figura 14-D**).

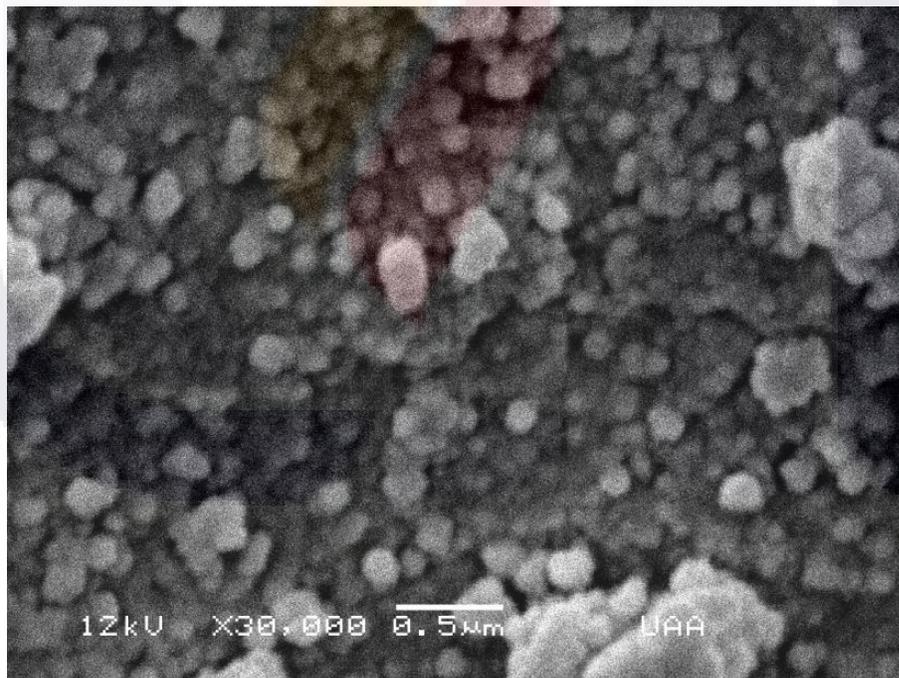


Figura 13. Microscopía electrónica de barrido a 30,000X. NP's entre 50 y 100 nm.

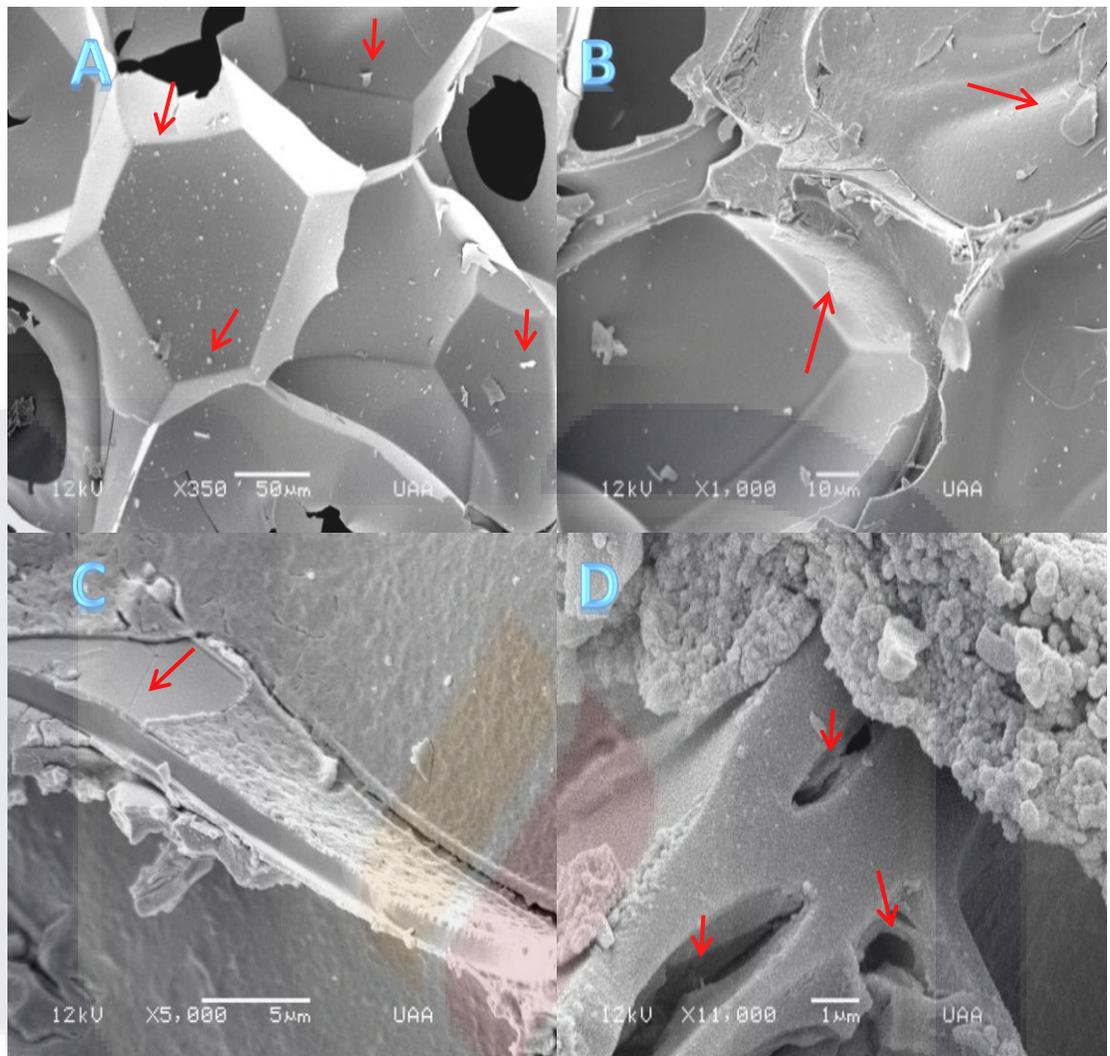


Figura 14. SEM de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita a diferentes aumentos **A)** puntos observados en la superficie de la perlita a x350. **B)** Capas rugosas en la superficie a X1,000. **C)** Superficie lisa donde no se adhirió el $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$. **D)** NP's en la superficie de la perlita, se distingue la forma esférica, se observan capas en los poros de la perlita.

8.3. Muestras de aire.

Los muestreos de aire de la prueba preliminar se llevaron a cabo en la unidad médica con ayuda del impactador ambiental de Andersen en los meses de marzo y abril, a las 10:00 y 10:30 de la mañana, donde al momento del muestreo todas las áreas se encontraban con actividades normales propias de cada una de las clínicas, se registró un flujo de entre 25 y 30 personas en todos los muestreos, el muestreador fue colocado al centro de la clínica (**Figura 15**).



Figura 15. A. Impactador ambiental de Andersen para muestrear aire en interiores. **B.** Impactador ambiental conectado al prototipo de filtro de aire diseñado.

El conteo de las UFCs impactadas se realizó pasadas 24 horas de incubación, después del muestreo. Se realizó la comparación entre los resultados obtenidos de los muestreos con y sin el filtro, el conteo de colonias se reporto como UFC/m³ y como porcentaje de inhibición (**Tabla 4**). Para los muestreos sin filtro, se observaron diferencias entre los niveles usados para el muestreo, encontrando la mayor cantidad de UFC en el nivel seis, indicando que las bacterias son muy pequeñas, ya que logran pasar por el tamaño de poro de este nivel; en el nivel uno tambien se reportó crecimiento solo en menor proporción. También se encontraron diferencias entre las tres clínicas muestreadas, siendo la de mayor carga microbiana la clínica 3, comarada con las clínica 1 y 2. La variación de la carga microbiana pudo ser debida a las distintas condiciones y actividades de cada una de las áreas; en la clínica 1, se atendían limpiezas y periodoncias; en la clínica 2, limpiezas, ortodoncias y prácticas operatorias; y en la clínica 3 limpiezas, extracciones, prácticas operatorias y endodoncias. Además durante algunos muestreos algunas ventanas estaban abiertas y las puertas de acceso eran abiertas con regularidad, además de que el aire acondicionado se encontró encendido en 3 ocasiones. Se lograron porcentajes de inhibición del 92 a 100% para la clínica 1, 93% para la clínica 2, y de 72% para la clínica 3, siendo la última la mas contaminada.

Tabla 4. Carga microbiana total del aire para la prueba preliminar en las clínicas hospitalarias

Muestra	Nivel	UFC/L								
		Clínica 1			Clínica 2			Clínica 3		
		SF	CF	%I	SF	CF	%I	SF	CF	%I
1	1	64	5	92.1	71	2	97.1	54	5	90.7
	6	309	0	100	203	7	96.5	396	75	81.0
2	1	64	2	96.8	38	0	100	75	21	72.0
	6	273	16	94.1	346	7	97.9	433	61	85.9
3	1	33	0	100	49	0	100	87	2	97.7
	6	210	0	100	415	28	93.2	490	31	93.6

Unidades Formadoras de Colonia por Litro (UFC/m³). Sin Filtro (SF). Con Filtro conectado (CF). Porcentaje de inhibición microbiana (%I).

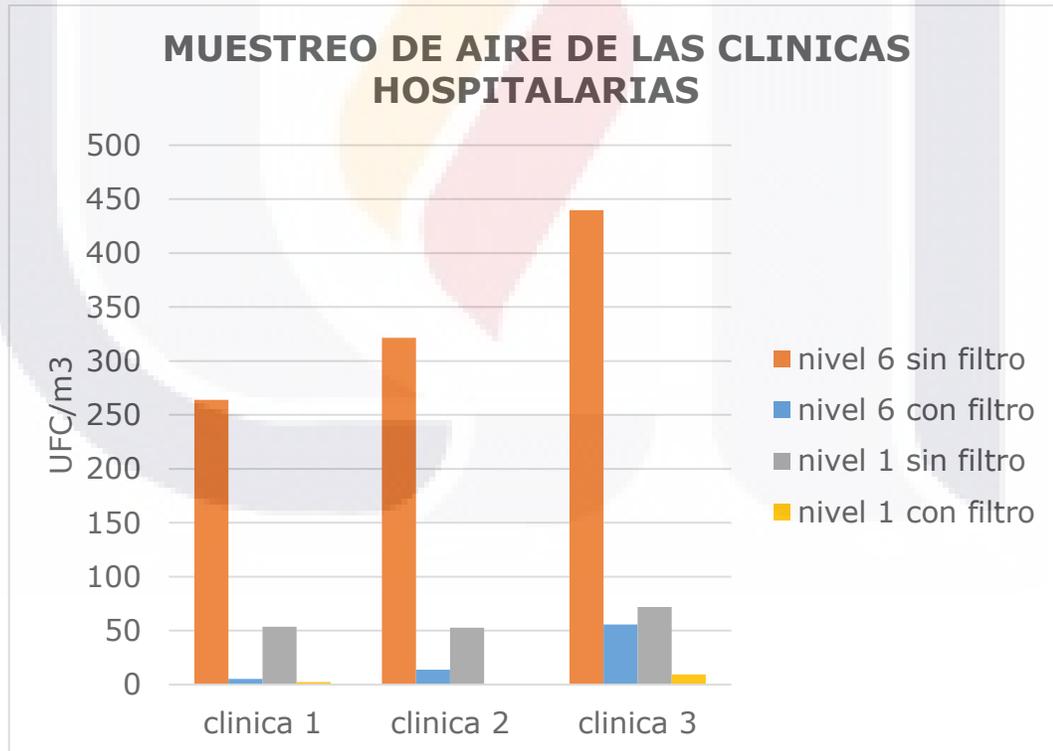


Gráfico 1. Muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, el gráfico se separa por clínicas, nivel de muestreo y por el uso del filtro.

En la segunda prueba se usaron los 6 niveles del impactador, los valores de la carga microbiana total, resultaron muy similares a los obtenidos en la prueba preliminar. El muestreador es multi-orificio por lo cual las bacterias pueden ser clasificadas como partículas no respirables y partículas respirables según el nivel de impactación, los niveles 1 al 2 corresponden a las no respirables, y los niveles 3 al 6 a las respirables. Lo que se encontró fue crecimiento microbiano en todos los niveles del impactador (**Figura 16**), y que al usar el filtro ninguna colonia fue observada, lo que indica que se logró la inhibición del crecimiento microbiano (**Figura 17**). Al comparar los resultados totales de los muestreos de las UFC/m³ para cada nivel y por cada muestreo (**Tabla 5**), se encontró que la mayor cantidad de bacterias impactadas fueron bacterias respirables, es decir, estas pueden entrar por vías aéreas respiratorias superiores y llegar a los pulmones y por lo tanto infectar a un paciente. Al comparar los resultados con y sin filtro, se determinó que, igual que en la prueba preliminar, se logró la inhibición del crecimiento microbiano al usar el filtro (**Gráfico 2**), lo cual indica que el filtro tiene actividad microbicida.

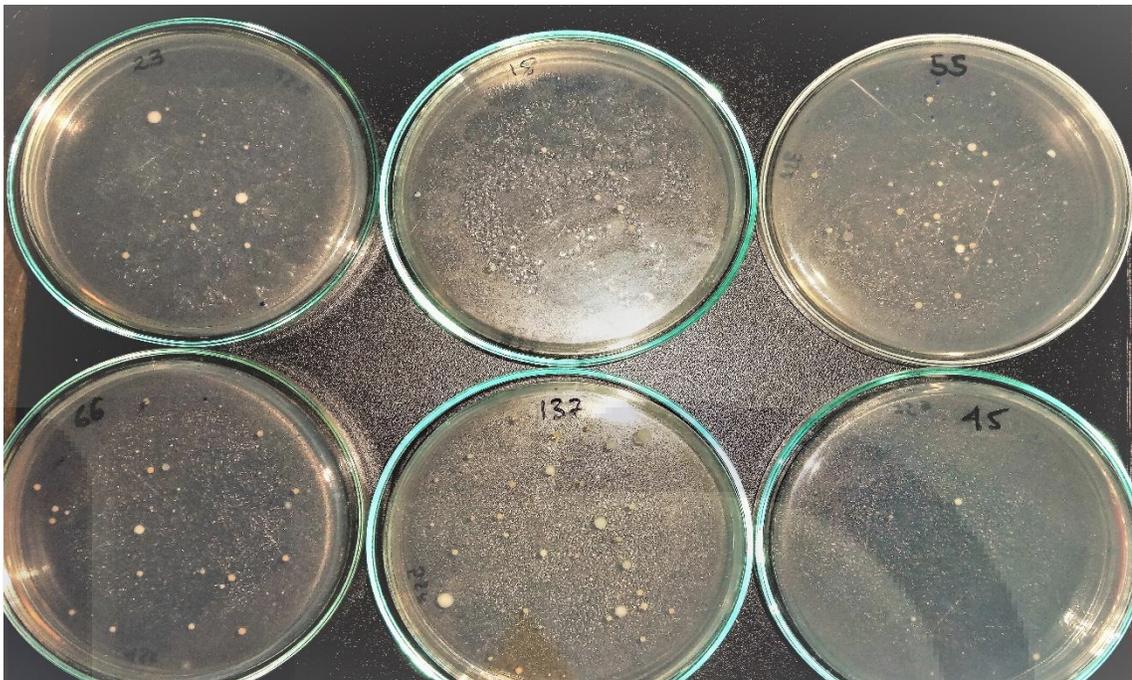


Figura 16. Bacterias impactadas en medios Mueller Hinton en un muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, sin el uso del filtro.

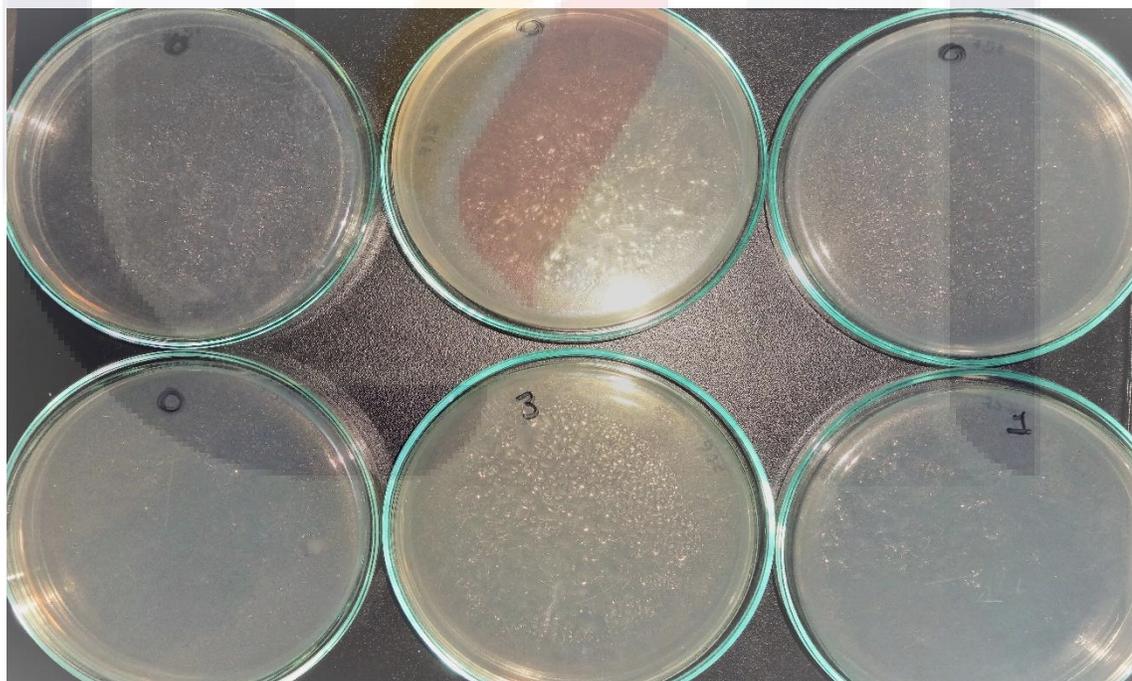


Figura 17.. Bacterias impactadas en medios Mueller Hinton en el muestreo de aire de las clínicas hospitalarias, con el uso del filtro, probando la eficiencia del filtro.

Tabla 5. Carga microbiana total del aire para el segundo muestreo en las clínicas hospitalarias.

		UNIDADES FORMADORAS DE COLONIA							
MUESTRA	TRATAM.	NIV	NIV	NIV	NIV	NIV	NIV	TOTAL	
		1	2	3	4	5	6		
CLINICA 1	1	SIN FILTRO	26	33	45	47	252	125	528
		CON FILTRO	5	7	5	2	16	7	42
	2	SIN FILTRO	35	61	52	45	280	57	530
		CON FILTRO	0	0	0	7	7	5	19
	3	SIN FILTRO	75	33	47	66	233	47	502
		CON FILTRO	2	0	0	2	5	0	9
CLINICA 2	1	SIN FILTRO	75	52	101	31	85	21	365
		CON FILTRO	5	2	5	2	2	9	26
	2	SIN FILTRO	61	38	90	24	35	12	259
		CON FILTRO	0	2	5	2	0	2	12
	3	SIN FILTRO	71	78	148	153	245	82	777
		CON FILTRO	5	0	0	2	2	21	31
CLINICA 3	1	SIN FILTRO	54	49	101	87	99	31	422
		CON FILTRO	2	5	0	0	5	7	19
	2	SIN FILTRO	101	78	165	200	377	108	1029
		CON FILTRO	2	5	0	7	7	5	26
	3	SIN FILTRO	54	42	130	155	323	106	810
		CON FILTRO	0	0	0	0	7	2	9

Resultados mostrados en UFC/m³, nivel en el que se colocaron las cajas (NIV). El total representa la cantidad total de bacterias en todos los niveles.

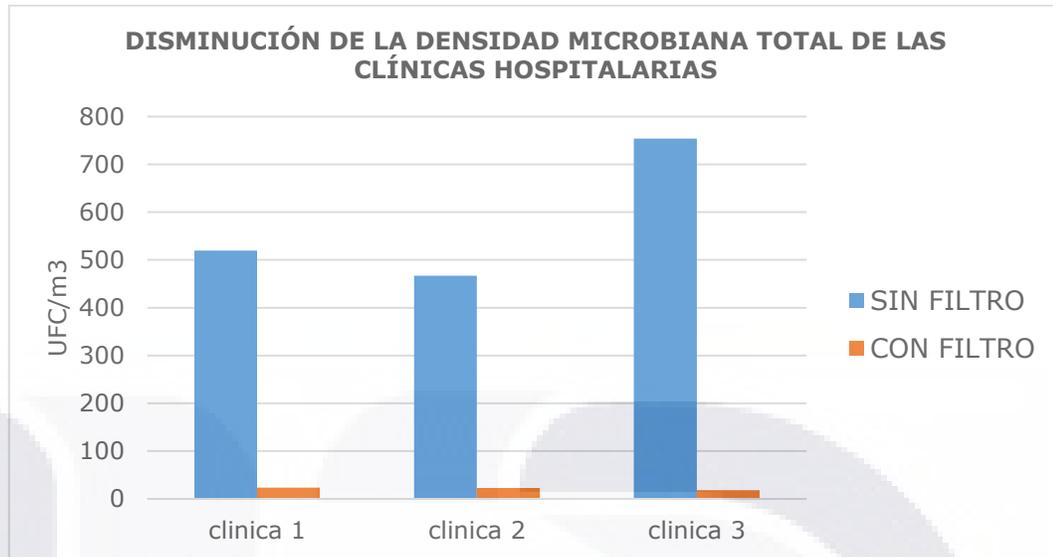


Gráfico 2. Disminución de la densidad microbiana total del aire con el uso del filtro en las tres clínicas hospitalarias muestreadas.

Para evaluar si las bacterias quedaban “atrapadas” en las perlitas del filtro o eran soportadas en estas, tras ser succionadas hacia el impactador, fueron tomadas algunas perlitas inmediatamente después del muestreo y se inocularon en agar Mueller Hinton; el resto de las perlitas fueron irradiadas con luz visible por 5 horas, de igual manera se tomaron algunas y se inocularon en agar Mueller Hinton (**Figura 18**) para determinar el crecimiento microbiano. El resultado de lo anterior fue que, a partir de perlitas de 5 de los muestreos, hubo crecimiento microbiano, indicando que algunas bacterias pueden adsorberse en la perlita. Por otro lado, las perlitas que fueron irradiadas no mostraron crecimiento bacteriano, es decir, si es que las bacterias fueron adsorbidas, al ser irradiado se activó la fotocatalisis del TiO_2-Cu^{2+} y se eliminaron las bacterias del sistema (**Tabla 6**).

Tabla 6. Crecimiento de bacterias de las perlititas usadas en el muestreo en agar Mueller Hinton.

Área	1				2				3			
Muestra	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
UFC d.m.	0	0	4	1	0	0	2	0	7	3	0	0
UFC d.m.i.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Unidades Formadoras de Colonia después del muestreo (UFC d.m) y Unidades Formadoras de Colonia de las perlititas irradiadas con luz visible (UFC d.m.i.).



Figura 18. Perlititas usadas en el filtro después del muestreo de aire colocadas en agar Mueller Hinton, A) perlititas sin irradiación de luz donde se observó crecimiento bacteriano, y B) perlititas irradiadas con luz visible durante 5 horas, sin crecimiento bacteriano.

8.4. Aislamiento de bacterias

De las UFC impactadas en los muestreos, se seleccionaron algunas bacterias, para su aislamiento, purificación e identificación, para con ellas realizar pruebas de inhibición con el material sintetizado. Se encontraron diversas bacterias tanto Gram-negativas como Gram-positivas, principalmente *E. coli* y *S. aureus*, como bacterias de importancia intrahospitalaria, también se distinguió la presencia de *Y. enterocolitica*, *Enterobacter* y *S. epidermidis*, estas bacterias fueron identificadas siguiendo el esquema de identificación con pruebas bioquímicas (**Tablas 8-9**). La bacteria más abundante tras la selección al azar fue *E. coli*.

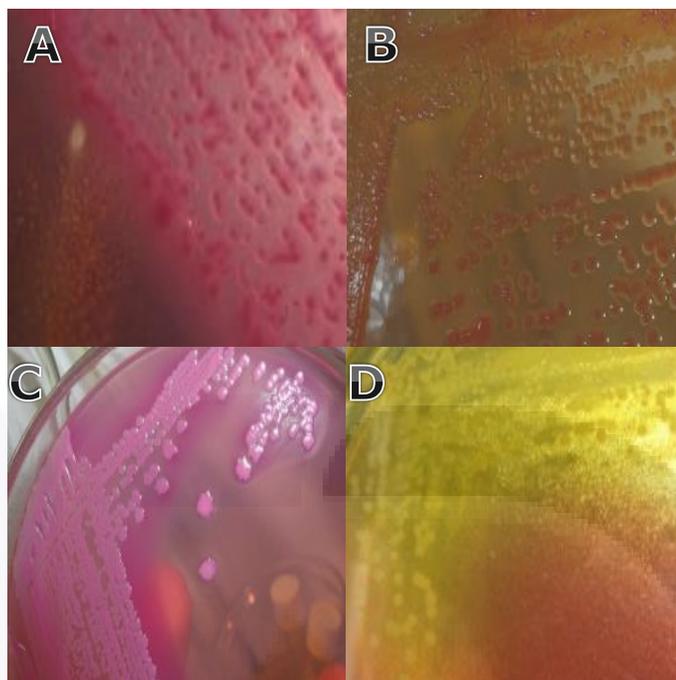


Figura 19. Bacterias aisladas en las muestras tomadas en las clínicas hospitalarias. Bacteria identificada como *E. coli* en agar MacConkey (**A**). Bacteria identificada como *Y. enterocolitica* en agar MacConkey (**B**). Bacteria identificada como *Enterobacter* en agar MacConkey (**C**). Bacteria identificada como *S. aureus* en agar Sal y Manitol (**D**).

Tabla 7. Pruebas bioquímicas para las bacterias Gram-negativas aisladas de los muestreos de aire de las clínicas hospitalarias.

		Bacteria 1	Bacteria 2	Bacteria 3	Bacteria 4
Descripción colonial en agar McConkey	Forma	Circular	Circular	Circular	Circular
	Bordes	Entero	Entero	Entero	Entero
	Elevación	Plana	Plana	Plana	Elevado
	Tamaño	Mediana	Pequeña	Medianas	Grande
	Color	Rosa	Rosa	Rosa palo	Rosa
Forma	Diplococos	Bacilos	Bacilos	Bacilos	
Lactosa	+	-	+	+	
Sacarosa/Lactosa	+	-	+	+	
Glucosa	+	+	+	+	
Gas	-	-	-	+	
Ác. sulfhídrico	-	-	-	-	
Descarboxilación de lisina	+	-	+	+	
Desaminación de la lisina	-	-	-	-	
Movilidad	+	-	+	+	
Indol	-	-	-	-	
Ornitina descarboxilasa	-	-	+	+	
Citrato Simmons	-	-	+	+	
Bacteria identificada		<i>E. coli</i>	<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Serratia</i>

Tabla 8. Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias Gram-positivas del muestreo de aire de la clínica hospitalaria.

		Bacteria 1	Bacteria 2	Bacteria 3
Descripción colonial en agar sal y manitol	Forma	Circular	Circular	Circular
	Bordes	Entero	Entero	Entero
	Elevación	Plana	Plana	Plana
	Tamaño	Mediana	Pequeña	Pequeño
	Color	Amarillo	Amarillo	Amarillo
Forma y/o Agrupación	Estafilococo	Bacilo	Estafilococo	
Manitol	+	+	-	
Catalasa	+	+	+	
Coagulasa	+	-	-	
Bacteria identificada		<i>S. aureus</i>	<i>Bacillus sp.</i>	<i>S. epidermidis</i>

8.5. Pruebas de inhibición bacteriana

Se realizaron pruebas de inhibición en solución frente a algunas de las bacterias aisladas de las clínicas hospitalarias, de las cuales se seleccionaron *E. coli*, *S. aureus* y *Y. enterocolitica*. Las pruebas se llevaron en irradiación con luz visible, para observar si el catalizador presentaba efecto microbicida bajo estas condiciones, y en oscuridad para observar el efecto microbicida del cobre, se observó el efecto microbicida según la cantidad de material utilizado de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ @perlita. Se colocaron 5 tubos con bacteria, cada uno con diferentes condiciones: el tubo 1 se tomó como control, solamente con la suspensión bacteriana; el tubo 2 contenía la suspensión bacteriana más 10 perlitas limpias, es decir sin $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$. Los tubos 3, 4 y 5 contenían 10, 20 y 30 perlitas con material impregnado, respectivamente.

Para *S. aureus*, en el tratamiento con irradiación de luz visible (**Tabla 10**), se observó la inhibición del crecimiento desde la concentración más baja, es decir, con las 10 perlitas que contenían 0.042gr de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$, observándose que la inhibición se incrementó conforme aumentaba la concentración del catalizador. El 100% de la inhibición se logró con el uso de 30 perlitas, las cuales corresponden a 0.088gr de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$. Para el caso del

tratamiento en oscuridad (**Tabla 11**) también se observó que existe inhibición del crecimiento, sin embargo, este se presentó de manera paulatina, es decir, requiere una concentración más alta para tener los mismos efectos que al ser irradiado, con lo cual se muestra el efecto inhibitorio del Cu^{2+} . Al observarse una mayor inhibición en el catalizador activado con luz, se confirma que es activo bajo luz visible que además tiene un efecto sinérgico gracias al dopante.

Tabla 9. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre *S. aureus* irradiada con luz visible.

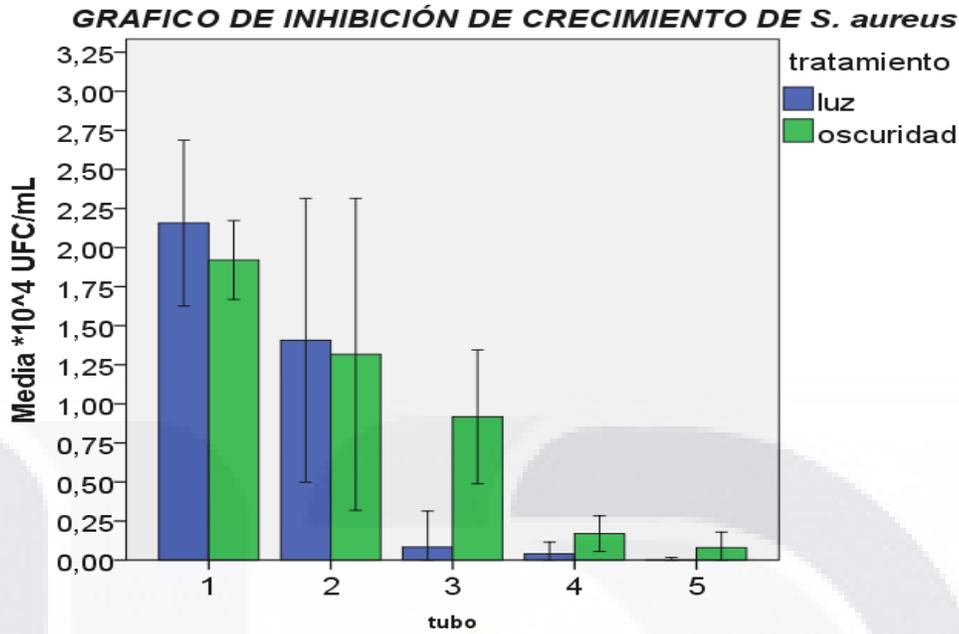
	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO ₂ -Cu ²⁺ (gr)	0	0	0.032	0.059	0.088
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,07	1,01	0,19	0,07	0,00
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,00	1,73	0,02	0,01	0,01
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,40	1,48	0,04	0,04	0,00

Número de perlitas utilizadas en cada tubo (#pelitas); promedio en gramos de TiO₂-Cu²⁺ en las perlitas (TiO₂-Cu²⁺), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).

Tabla 10. Inhibición del crecimiento de *S. aureus* en oscuridad.

	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO ₂ -Cu ²⁺ (gr)	0	0	0.042	0.083	0.100
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,83	0,73	0,90	0,18	0,08
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,03	1,40	1,07	0,13	0,04
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,90	1,83	0,79	0,20	0,12

Número de perlitas utilizado en cada tubo (#pelitas); promedio en gramos de TiO₂-Cu²⁺ en las perlitas (TiO₂-Cu²⁺), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).



Barras de error: 95% IC

Gráfico 3. Inhibición del crecimiento de *S. aureus* en solución a diferentes concentraciones de TiO_2-Cu^{2+} @perlita. Se observan diferencias en los tubos que contenían perlitas impregnadas con respecto al tubo 1 (control) y tubo 2 (Blanco).

Para los tratamientos frente a *E. coli*, se demostró, con la irradiación de luz visible (**Tabla 12**), la inhibición del crecimiento desde la menor concentración, 10 perlitas, la cual resultó ser significativa con respecto al control, de igual manera la inhibición aumento al incrementar la cantidad del catalizador. En el tratamiento de oscuridad (**Tabla 13**) también se mostró el efecto de inhibición, el cual fue mucho menor que en irradiación, requiriendo mayor cantidad de material para posiblemente tener el mismo efecto inhibitorio. No se alcanzó el 100% de la inhibición frente a esta bacteria.

Tabla 11. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre *E. coli* irradiada con luz visible

	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO_2-Cu^{2+}	0	0	0.034	0.064	0.084
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,54	1,48	0,37	0,16	0,01
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,80	1,23	0,28	0,17	0,08
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,41	1,26	0,15	0,12	0,00

Número de perlitas utilizado en cada tubo (#pelitas); promedio en gramos de TiO_2-Cu^{2+} en las perlitas (TiO_2-Cu^{2+}), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).

Tabla 12. Inhibición del crecimiento de *E. coli* en oscuridad.

	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO ₂ -Cu ²⁺	0	0	0.059	0.102	0.132
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,54	1,36	0,89	0,60	0,41
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,01	1,57	0,51	0,47	0,39
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	2,06	1,21	0,35	0,28	0,19

Número de perlitas utilizado en cada tubo (#perlitas); promedio en gramos de TiO₂-Cu²⁺ en las perlitas (TiO₂-Cu²⁺), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).

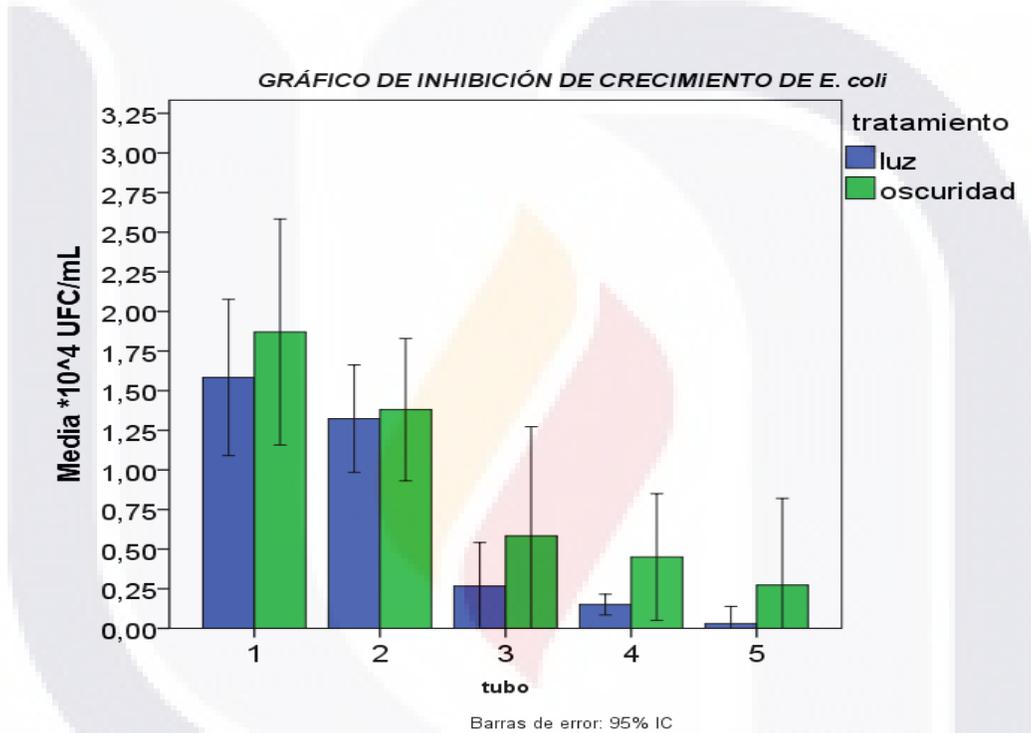


Gráfico 4. Inhibición del crecimiento de *E. coli* en solución a distintas concentraciones de TiO₂Cu²⁺@perlita, donde se observan diferencias en los tubos que contenían perlitas impregnadas con respecto al tubo 1 (control) y tubo 2 (blanco).

Para *Y. enterocolitica*, en irradiación con luz visible (**Tabla 14**), se observó que la inhibición resulta ser eficiente desde la concentración más baja, se logró la inhibición del 100% del crecimiento con la segunda concentración usada. Mientras que en oscuridad (**Tabla 15**) la inhibición se presentó de manera paulatina, de igual manera no se alcanzó el 100% de la inhibición, por lo que requiere mayor cantidad para presentar mayores efectos de inhibición.

Tabla 13. Inhibición del crecimiento por foto-catálisis sobre *Y. enterocolitica* irradiada con luz visible

	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO ₂ -Cu ²⁺	0	0	0.083	0.098	0.163
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,80	0,60	0,40	0,00	0,00
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,72	0,68	0,22	0,04	0,00
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,63	0,82	0,07	0,03	0,00

Número de perlitas utilizado en cada tubo (#pelitas); promedio en gramos de TiO₂-Cu²⁺ en las perlitas (TiO₂-Cu²⁺), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).

Tabla 14. Inhibición del crecimiento de *Y. enterocolitica* en oscuridad.

	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
# perlitas	0	10	10	20	30
TiO ₂ -Cu ²⁺	0	0	0.053	0.069	0.104
Prueba1 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,78	0,88	1,27	0,62	0,38
Prueba2 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,84	1,40	0,96	0,54	0,27
Prueba3 (*10 ⁴ UFC/mL)	1,93	1,24	0,85	0,77	0,22

Número de perlitas utilizado en cada tubo (#pelitas); promedio en gramos de TiO₂-Cu²⁺ en las perlitas (TiO₂-Cu²⁺), unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL).

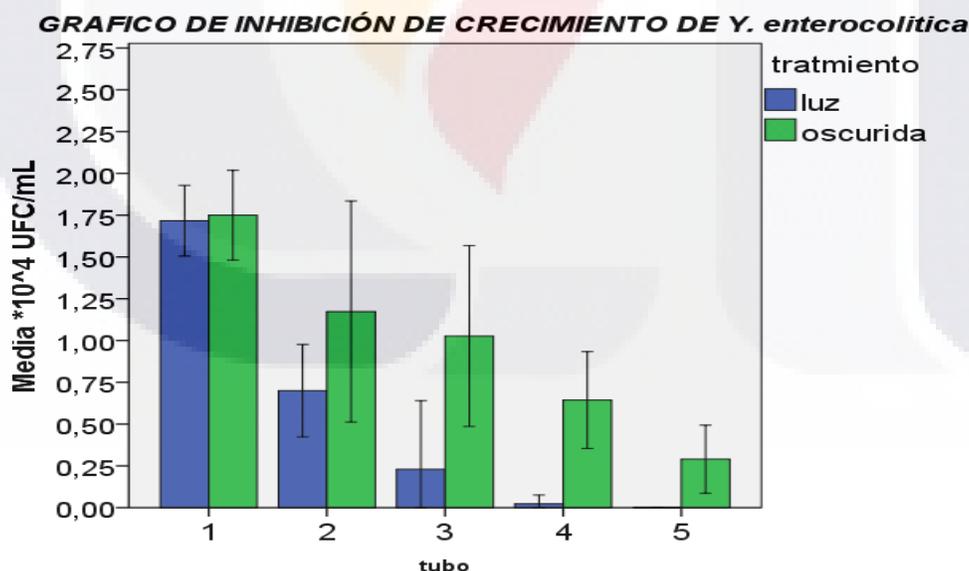


Gráfico 5. Inhibición del crecimiento de *Y. enterocolitica* en solución con diferentes tratamientos a distintas concentraciones de TiO₂Cu²⁺@perlita, donde se observan diferencias en los tubos con NP's con respecto al tubo 1 (control).

De igual manera que en los muestreos de aire, las perlititas empleadas en el experimento se inocularon en agares específicos, según la bacteria empleada, para observar el comportamiento de las bacterias en la superficie de las perlititas. Se tomaron 10 perlititas de cada tubo, se inocularon en agar, se incubaron 24 horas a 37 °C. Los resultados mostraron que en las perlititas que no tenían catalizador del tubo 1, presentaron crecimiento de bacterias en la mayoría de las perlititas (**Figura 21-1**), indicando que las bacterias pueden adherirse a la superficie, además se comprueba que por sí sola la perlitita no tiene efectos de inhibición. En las perlititas que provenían de los tubos 3, 4 y 5 que contenían el catalizador, el crecimiento bacteriano fue disminuyendo, con respecto a la concentración proveniente, observando que en las perlititas que provenían del tubo con 30 perlititas, muy pocas presentaron crecimiento de bacterias, indicando que la concentración del catalizador afecta directamente en la inhibición de los mo ´s empleados (**Figura 21**).

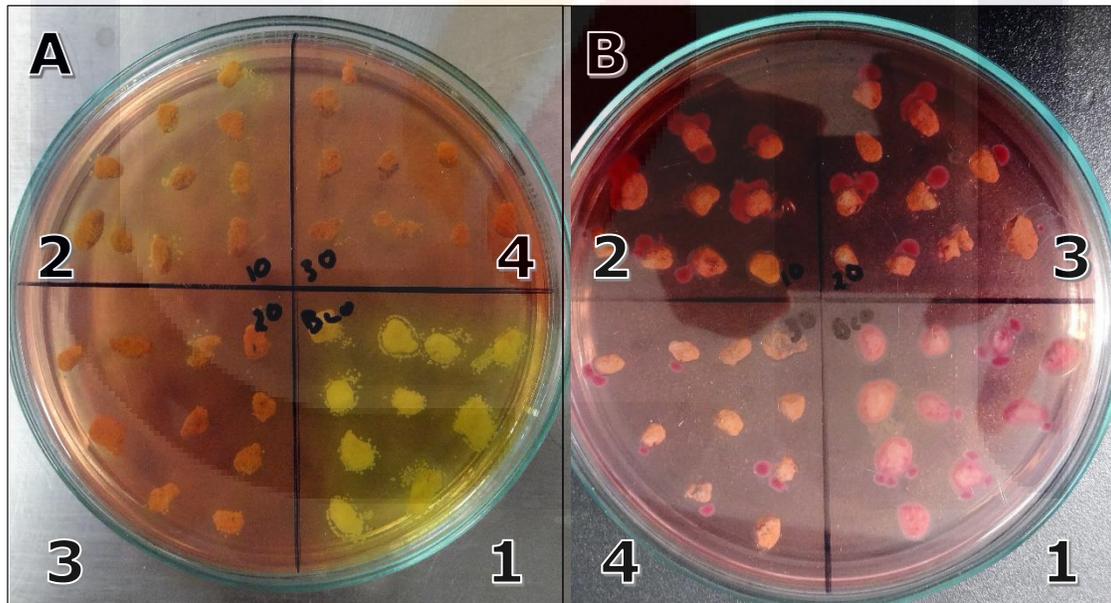


Figura 20. Perlitas en agar específico después de las pruebas de inhibición. **A)** sal y manitol para el crecimiento de *S. aureus*. **B)** McConkey para el crecimiento de *E. coli*. 1) Perlitas del tubo 2, 2) perlititas del tubo 3, 3) perlititas del tubo 4, 4) perlititas del tubo 5. Alrededor de las perlititas se pueden distinguir en color rosa las bacterias de *E. coli*, entre mayor es la concentración menor es la cantidad de bacterias.

8.6. Degradación de compuestos orgánicos volátiles.

En la degradación de COV's se utilizó un alcohol primario (etanol) como sustancia para llevar a cabo los experimentos, el reactor se armó con el fin de hacer circular un flujo de aire a través del filtro cargado del gas a degradar (**Figura 20**). El etanol se dosificó con una bomba, el flujo de aire fue introducido empleando una bomba de aire, con la cual el aire se dirigió hacia la entrada del fotorreactor, el etanol no degradado y los metabolitos producidos, se recuperaron a la salida del reactor utilizando un refrigerante para condensar el gas y agua destilada para disolver las sustancias.

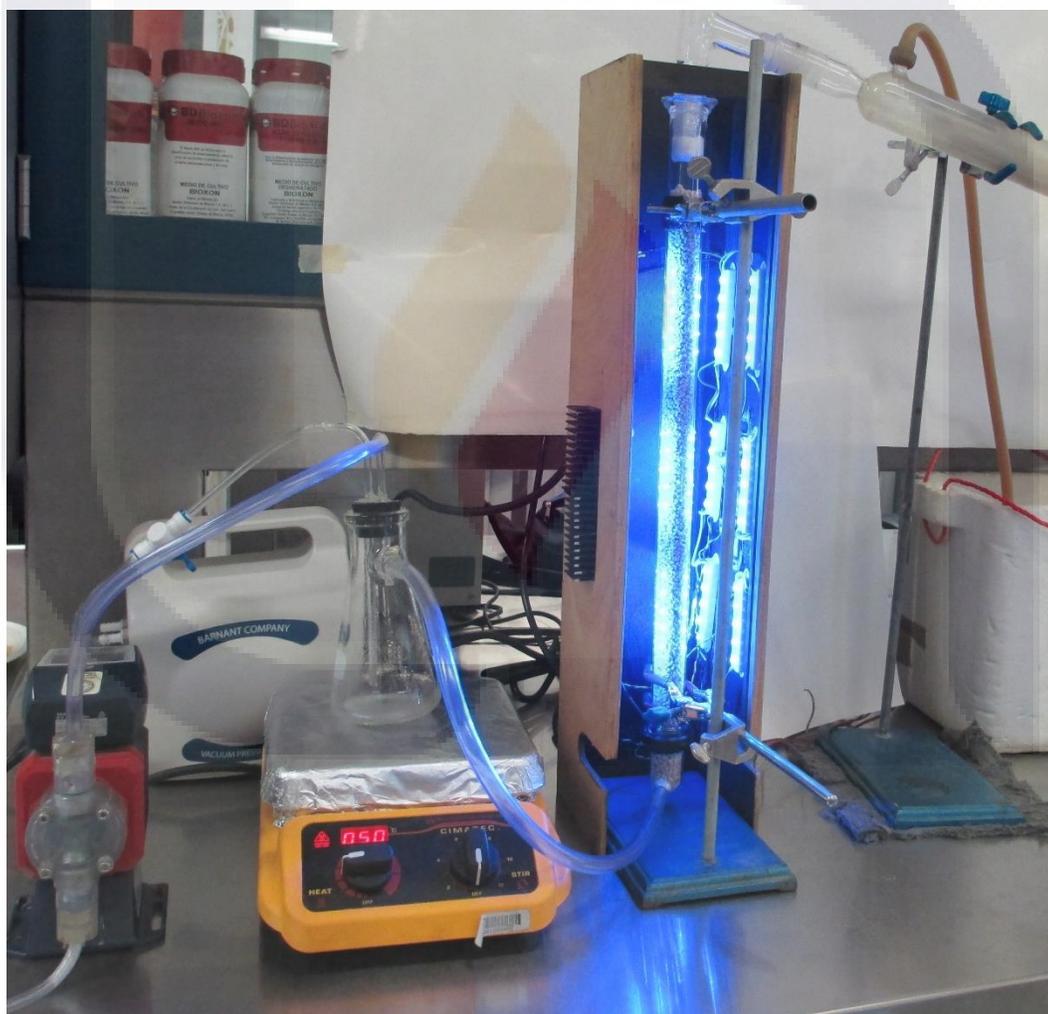


Figura 21. Reactor foto-catalítico diseñado para la degradación de etanol.

Como una prueba presuntiva del funcionamiento del filtro las sustancias recuperadas se analizaron con el reactivo de Tollens, el cual indica la presencia de aldehídos (sustancia producida por la oxidación de alcoholes primarios) en una muestra, se colocaron algunas gotas de la sustancia problema recuperada, se agregaron 1.5 mL de reactivo de Tollens, y se observó la formación de un anillo de plata (**Figura 21**), lo que da prueba positiva para la presencia de aldehídos. La presencia de aldehídos indica que existe degradación del etanol introducido, sin embargo, no es un producto deseable ya que se busca la mineralización completa de los COV's que sean introducidos al sistema.

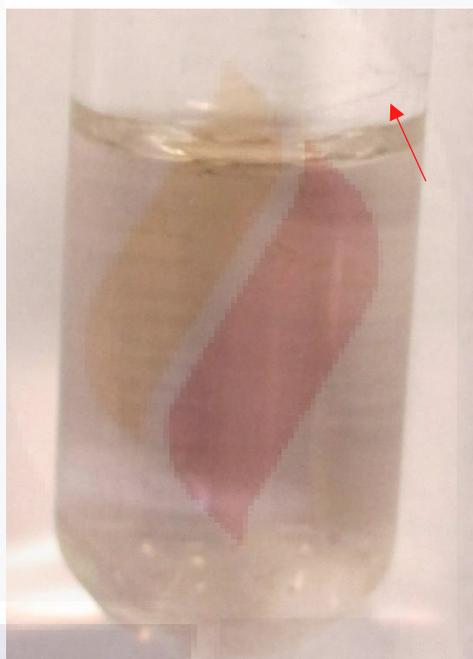


Figura 22. Formación del anillo de plata para el producto final de la foto-catálisis de etanol.

9. Discusiones

La destrucción o prevención de crecimiento de mo' s es esencial en el control de transmisión de enfermedades infecciosas, por eso existen varios tratamientos ya sea físicos, mecánicos y químicos, para un mayor control de los mo' s patógenos. Los agentes físicos, implican el uso de calor y radiación ionizante; mientras que los agentes mecánicos consisten en la filtración, y el uso de ondas sónicas o ultra sónicas; para el caso de los agentes químicos suelen actuar por diferentes mecanismos para matar o prevenir el crecimiento de mo' s, incluyendo la destrucción y la modificación de membranas, pared celular, enzimas, y ácidos nucleicos.

Enfocados en el uso de un tratamiento químico para la purificación de aire de espacios cerrados, se desarrolló la implementación de un proceso con actividad fotocatalítica empleando $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%) soportado en perlita, con la cual se diseñó un prototipo de filtro de aire con características adecuadas para la purificación de aire de hospitales.

Las nanopartículas fotocatalíticas de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%), fueron sintetizadas usando como precursores el isopropoxido de titanio (IV) y sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4\bullet 5\text{H}_2\text{O}$). Este material fue soportado por inmersión en perlitas donde se logró la incorporación de 0.38gr de nanomaterial por gramo de perlita. Sin embargo, al realizar la técnica de inmersión se observó la pérdida de peso debido al daño mecánico producido sobre la perlita, esta observación fue previamente reportada por Saucedo, *et al.* (2008) quien menciona que la pérdida de peso se debe a la baja estabilidad mecánica que presenta la perlita, es por eso, que el peso final de la perlita indicaría solo una aproximación del $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ incorporado en la superficie, ya que debido a la pérdida de peso por la técnica la cantidad de catalizador soportado debería ser mayor a la reportada. Un análisis realizado por Encarnación Abriz (2014) quien analizó varios materiales de soporte, entre ellos perlitas, perlitas de vidrio, porta-objetivo de vidrio, fibra de vidrio y carbón activado, con el fin de obtener el de mejores características para una aplicación fotocatalítica, encontró que la perlita resultó ser de los mejores candidatos debido a la porosidad que posee,

ya que así se aumenta la superficie de contacto, menciona que a pesar de presentar de la baja estabilidad mecánica ese el mejor soporte analizado. Existen diversas metodologías de soporte, entonces, la pérdida de peso podría evitarse cambiando el método de inmersión por un procedimiento de menor manipulación mecánica, cabe mencionar que la pérdida de peso solo se observó en la técnica de inmersión.

Para corroborar la presencia de las NP's en las perlitas, estas se caracterizaron con la técnica SEM, donde se logró observar a varios aumentos (**figura 14**) como se encontraba adherido el catalizador sobre la perlita. En el análisis se encontró que el material presentó tamaños de entre 50 y 100 nm, lo que demuestra que la técnica empleada permite la síntesis de materiales con tamaños nanométricos, no se realizó la composición elemental de estos, lo cual sería un buen parámetro para corroborar que el cobre se encuentra como dopante. Se identificaron capas rugosas en la superficie las cuales indicaron la presencia del nanomaterial, el material se encontró con una distribución homogénea y se distinguieron capas en los poros de la perlita, lo cual aumenta la superficie de contacto y lo convierte en un material efectivo para el tratamiento de aire. Hinojosa, *et al.* (2014) utilizó perlitas como material de soporte para TiO₂-I y las caracterizó mediante SEM, obteniendo resultados semejantes a los aquí reportados, logró distinguir estructuras en forma de aglomeración elevada sobre la perlita, confirmó el tamaño nanométrico y su buena distribución sobre la superficie.

Con el material sintetizado, se diseñó un prototipo de filtro para el tratamiento de aire de interiores de hospitales. El diseño de un reactor depende de las características que sean deseables y el objetivo de su diseño, se utilizó un tubo de vidrio que permitiera la irradiación de luz para poder activar el catalizador, un reactor empacado con un material poroso resulta adecuado para el tratamiento de aire de interiores, ya que permite una mayor superficie de contacto con los contaminantes, y por lo tanto se esperaba que presentara una mayor eficiencia en el proceso de degradación.

Para la evaluación microbicida del filtro diseñado se utilizó un impactador ambiental de cascada de Andersen de seis niveles, con el cual se

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

muestreo aire durante 15 min, sin el filtro, para medir la carga microbiana total en ambientes hospitalarios y con el filtro para observar como disminuye dicha carga microbiana debido al catalizador.

De los muestreos se identificaron bacterias Gram-negativas, como *E. coli*, *Y. enterocolitica*, *Enterobacter*, y bacterias Gram-positivas, como *S. aureus*, *B. subtilis*, *S. epidermidis*. Estas bacterias son comunes en ambientes hospitalarios, sin embargo, el hecho de estar presentes en el aire es un problema específico debido son un grave un foco de infección entre pacientes. Cabe mencionar que no se realizó el aislamiento de todas las colonias impactadas en el muestreo, las colonias fueron tomadas de manera aleatoria seleccionando 4 colonias por muestreo, lo que provocó que no se detectaran todas las posibles bacterias presentes y comunes en ambientes hospitalarios; por lo cual un estudio profundo para identificar todos los mo ´s presentes sería adecuado, para así poder demostrar con mayor precisión sobre cuales bacterias se presenta un efecto inhibitorio. De las bacterias aisladas, *Staphylococcus sp* se asocia en diversas enfermedades tales como infecciones de la piel, infecciones del tracto urinario e intoxicación alimentaria. Por otro lado, *Bacillus sp* pueden ser encontrados en casi todos los ambientes, y por formar esporas pueden sobrevivir durante un largo periodo de tiempo (Agbagwa & Onyemaechi, 2014).

Existen varios estudios que se han enfocado en la identificación de bacterias en ambientes hospitalarios, encontrando una gran variedad con alta incidencia en distintas áreas de hospitales, algunas de ellas son *Bacillius spp.* *Pseudomonas spp.* *Shigella spp.* *Staphylococcus aureus*, *E. coli*, *Enterobacter ludwigii*, *Proteus mirabilis*, *Klebsilla pneumoniae*, entre otras (Augusto, Oliveira, De Melo, Soares, & Paiva, 2014; Maldonado Vega, et al., 2014).

Para la toma de muestras el tiempo se varió entre 10 y 15 minutos, el tiempo óptimo de muestreo en este trabajo fue de 15 minutos, el mismo reportado por Moctezuma, et al (2015) en un trabajo para el aislamiento de hongos. En todos los muestreos sin usar el filtro, se encontró una carga microbiana elevada, la cual pudo ser reducida hasta en un 100% con el filtro

fotocatalítico, por lo que este puede ser considerado con actividad microbicida.

Al utilizar el muestreador de aire de Andersen, se determinó la cantidad de bacterias respirables y no respirables, considerando el tamaño de los poros en cada nivel, que permiten el paso solo de los mo's con diámetros que van desde 1.18 a 0.254 mm (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2015). La mayor cantidad de bacterias se impactaron en los niveles 5 y 6 del impactador, lo cual indica que una gran cantidad de mo's son de tamaños tan pequeños que pueden ingresar a las vías respiratorias. Li y Hou (2005) indican que se registran concentraciones de bacterias que oscilan entre 10 y 100 UFC/m³. Otros autores reportan valores entre 42 y 325 UFC m³, 10 y 1000 UFC/m³, realizados en hospitales en Colombia (Pereira & Caicedo, 2014). Todos indican que se superan valores considerados normales para las actividades que realizan. En este estudio los valores reportados superan en gran medida lo que sugiere la OMS, con estos niveles de contaminación de mo's aerotransportados se enfrentan mayores problemas de IN.

Dado que existió variación en los muestreos de aire en todas las clínicas se pudo haber afectado la carga microbiana del aire. Por ejemplo, el hecho de que las ventanas se encontraron abiertas en algunas ocasiones, se puede suponer que bacterias del exterior contaminaron el interior del area hospitalaria muestreada; otro ejemplo es si el aire acondicionado estaba o no en funcionamiento durante el muestreo, se podría dar el caso de que si este no tiene mantenimiento continuo, es factible de ser un ambiente favorable para las bacterias, y cuando el aire es encendido estas pueden ser expulsadas al espacio hospitalario.

En México no existe una regularización formal para la prevención del aire contaminado, diversos estudios que han sido realizados se han enfocado en determinar la presencia de ciertas bacterias en el ambiente, y pocos en la cantidad de mo's que están presentes, no existen normas para el control, sin embargo si existe una guía del Comité para bioaerosoles de American Convergence of Governamental Industrial Hygienest para la valoración de los

bioaerosoles, además la OMS determina que las concentraciones máximas de mo's en salas de hospitales debe ser menos a 100 UFC/m³ y en quirófanos menor a 10 UFC/m³. Además de que con las normas mexicanas (NOM-045-SSA2-2005), se establecen los criterios que deberán seguirse para la prevención, vigilancia y control de epidemiológicos de IN que afectan la salud de los usuarios.

Algunos autores han manejado el efecto foto-catalítico contra diversos mo's, seleccionando los de mayor importancia hospitalaria según sea el caso. Para fines de este trabajo, después de la identificación de mo's se procedió a evaluar la actividad bactericida de TiO₂-Cu²⁺@perlita (1%), para lo cual se seleccionaron bacterias Gram-negativas (*E. coli* y *Y. enterocolitica*) y Gram-positivas (*S. aureus*) para realizar pruebas de inhibición *in vitro*. Las pruebas se realizaron tanto en irradiación con luz visible como en oscuridad, para observar el efecto microbicida como fotocatalizador y por la simple presencia del cobre. Según los resultados se encontró que todos los tratamientos con iluminación de luz visible presentaron un efecto inhibitorio significativo, alcanzando la inhibición completa a las 5 horas de irradiación. Los tratamientos en oscuridad también presentaron inhibición, esta se presentó de manera paulatina y no alcanzo el 100% de inhibición de las bacterias en las 5 horas de tratamiento.

El efecto de las NP's no ha sido estudiado a detalle, pero se han formulado varias posibles teorías de como sucede el efecto inhibitorio. El tamaño del catalizador es nanométrico mientras que el de las bacterias es micrométrico, esta podría explicarse como una de las razones por las cuales las partículas de TiO₂-Cu²⁺ pueden envolver a las bacterias como *E. coli*, lo cual puede provocar un daño mayor a su estructura vital (McEvoy & Zhang, 2014). Normalmente un fotocatalizador no es activo en oscuridad según varios estudios realizados. Sin embargo, en este estudio el dopante por si solo ha demostrado tener efecto microbicida debido a que interactúa con grupos amino y carboxilo en las superficies de células microbianas. A concentraciones suficientemente altas, los iones libres de Cu²⁺ pueden inducir la formación de ROS, que inhiben tanto la replicación del ADN y la síntesis de aminoácidos.

Se ha encontrado que parece tener efectos antibacterianos más débiles que los que se presentan con la plata, el cobre tiene una mayor gama de actividad microbica contra hongos, especialmente *Saccharomyces cerevisiae*, y diversas bacterias, incluyendo *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, y *Listeria monocytogenes* (Pelgrift & Friedman, 2013). Es así como se puede demostrar el efecto sinérgico entre la actividad microbica del TiO₂ y el dopante. Aunque como ya se mencionó, el mecanismo de estas nanopartículas no es bien conocido, la capacidad del cobre para ceder y aceptar electrones en el proceso, es un elemento crucial (Mairer, Pepper, & Gerba , 2000).

Se observó que el efecto microbica fue más sensible en la inhibición de *S. auerus*, que en la inhibición de *E. coli* y *Y. enterocolitica*. Una de las teorías para este comportamiento se explica por la diversa conformación de las bacterias gram (+) y gram (-). Karunakaran C. *et al.* (2010) sugieren la pared celular de las bacterias gram (-) actúa como una barrera para el proceso de foto-catálisis, pues está conformada por una membrana celular externa gruesa sobre la capa de peptidoglicano, además del periplasma que en conjunto rodean al citoplasma celular. Sin embargo, los cambios en la membrana de *E. coli*, producidos por ROS, son los eventos precursores que conducen a la lisis bacteriana.

Sobre la degradación de COV's existe una gran variedad de información con diversos fotocatalizadores utilizados en el diseño de fotorreactores con el fin de degradar una gran cantidad de COV's, en este trabajo se tomó etanol como producto a degradar, el flujo de aire con etanol se controló con válvulas, para así regular la permanencia del compuesto en la columna del filtro. Recuperar el producto de la reacción fotocatalítica permitió medir de manera indirecta el funcionamiento del filtro para determinar la presencia de etanol o productos secundarios como aldehídos. Por lo tanto, al obtener aldehídos como producto final indica que el fotocatalizador está activo, aunque no es lo ideal debido a que con la fotocátalisis se busca la mineralización completa de COV's.

Varios estudios enfocados en la degradación de COV's han demostrado tener eficiencias de degradación a las 4 horas (Hinojosa , Arriaga, Diaz, &

Rodríguez, 2013; Bum Kim, Tae Hwang, & Chang Hong, 2002), en algunos se ha estudiado el efecto de la temperatura, la humedad y el flujo, como el caso de Paredes *et al.* (2009) quienes estudiaron la degradación fotocatalítica de BTX, empleando TiO_2 en fibra de vidrio, observando que al aumentar la temperatura entre 80 y 100% aumenta la eficiencia de degradación. En el método utilizado en este trabajo, solo se controló la temperatura de la cámara de mezclado del etanol y aire, para lograr la fase gas del etanol, sin embargo, se observó que en la columna empacada la temperatura disminuye, y por lo tanto, el gas tiende a precipitar a lo largo de la columna quedando atrapado en esta, existen varios posibles métodos para controlar este problema, incluyendo la iluminación incandescente, para aumentar un poco la temperatura, o bien, con el uso de una mantilla de control de calentamiento.

Deben realizarse más pruebas de degradación utilizando diversos COV's, además de mezclas de estos, ya que algunos autores mencionan que la eficiencia de un proceso fotocatalítico en fase gas tiende a disminuir cuando existen varios componentes. Además de utilizar una técnica cuantitativa de cada uno de los componentes gaseosos, los productos de estos, para determinar la eficiencia fotocatalítica.

10. Conclusiones

Se lograron sintetizar NP's de $\text{TiO}_2\text{-Cu}^{2+}$ (1%) las cuales se soportaron por el método de inmersión a las superficies de perlitas porosas, con el fin de diseñar un prototipo de filtro de aire.

Se analizó el aire de una clínica hospitalaria para evaluar la cantidad de bacterias mesofílicas totales en el aire, donde se encontró que el aire se encuentra altamente contaminado, lo que puede generar problemas a la salud de los pacientes o el personal que ahí labora, se probó el filtro en las mismas áreas donde logró reducir considerablemente la cantidad microbiana total del aire hasta niveles permisibles según la OMS.

Con las bacterias identificadas en el muestreo de aire se mostró el efecto inhibitorio del material sintetizado, demostrando que existe un efecto sinérgico entre el TiO_2 como catalizador y el Cu^{2+} como productor de ROS y aceptor de electrones, activado con luz visible y en oscuridad respectivamente, el proceso fue activo bajo irradiación con luz visible, demostrando que se disminuyó el ancho de banda prohibida debido al dopaje con Cu^{2+} (1%).

Se demostró la degradación de etanol por foto-catálisis, empleando luz visible, en el reactor se puede controlar el flujo de aire, la temperatura y la humedad. La metodología propuesta para la eficiencia de degradación es cualitativa, se considera que es conveniente realizar pruebas cuantitativas de diversos COV para evaluar la eficiencia del fotorreactor.

11. Glosario

Aerobia: Organismo que requiere respirar oxígeno para poder desarrollarse.

Alcóxidos: compuestos que presentan en su estructura un grupo alquilo, un átomo de oxígeno y un ion metálico.

Anaerobia: Organismo que no requiere y es capaz de desarrollarse en un medio sin oxígeno.

Atmosfera: aire o estado del aire que se encuentra rodeando a la tierra, se define como la mezcla de gases en donde se encuentran, en suspensión, cantidades variables de partículas de materias sólida y líquida que envuelven la tierra.

Contaminación atmosférica: se refiere a la presencia en la atmosfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y los demás seres vivos.

Dopaje: proceso donde se agregan impurezas en un semiconductor puro, con el fin de cambiar sus propiedades eléctricas.

Edificio enfermo: conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación de aire interior.

Foto-catálisis: reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. La aceleración de una fotorreacción en presencia de un catalizador.

Fotolisis: descomposición química que, durante el proceso de fotosíntesis, sufre una molécula de agua debido a la acción de los rayos ultravioleta.

Fotometría: parte de la óptica que trata de las leyes relativas a la intensidad de la luz y de los métodos para medirla.

Hospital: Establecimiento o institución que proporciona servicios médicos especializados a los enfermos y unos locales adecuados en los cuales puedan funcionar dichos servicios.

Infección Nosocomial: es una infección no presente en el paciente en el momento del ingreso a un hospital, y que se desarrolla 48 horas después del ingreso.

Nanomaterial: materiales que cuentan con al menos una de sus dimensiones en la escala nanométrica, además de presentar características diferentes a las del material a su escala normal.

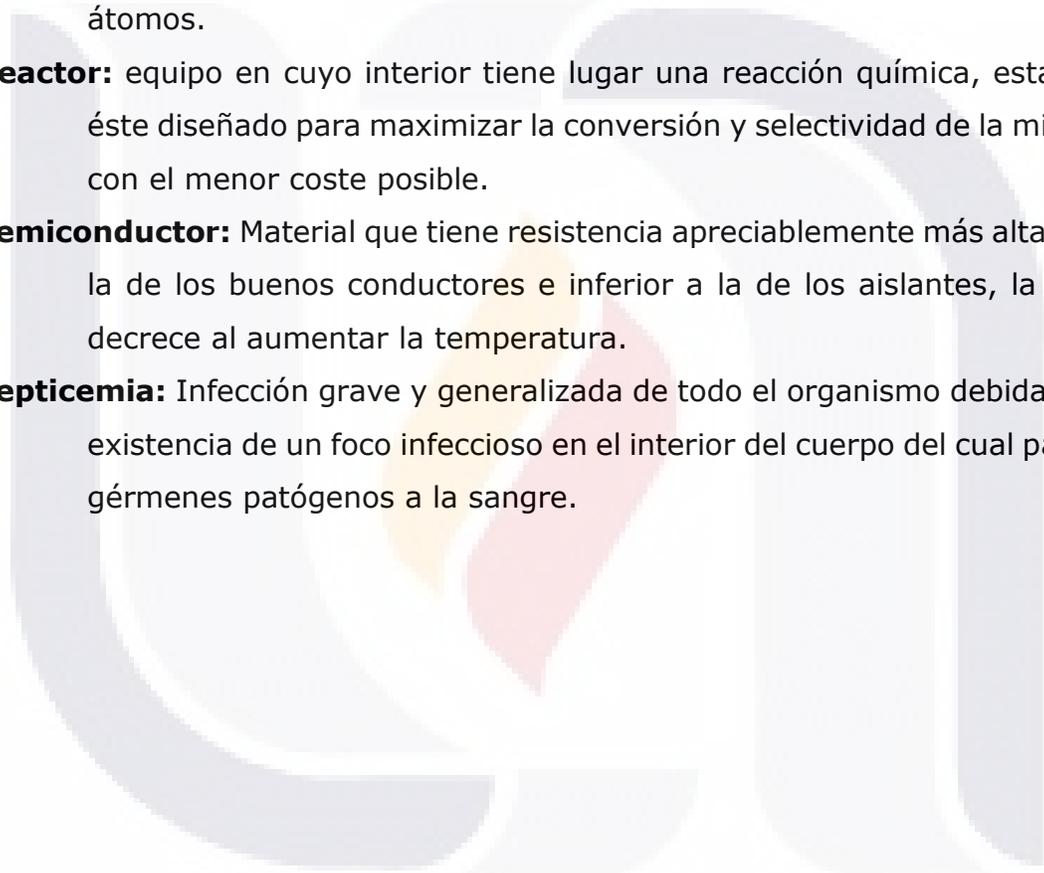
Nanopartícula: es una partícula que presenta una de sus dimensiones en un tamaño menos a 100nm.

Oxidación: Fenómeno químico en virtud del cual se transforma un compuesto por la acción de un oxidante, que hace que dicho compuesto aumente la cantidad de oxígeno y disminuya los electrones en alguno de sus átomos.

Reactor: equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, estando éste diseñado para maximizar la conversión y selectividad de la misma con el menor coste posible.

Semiconductor: Material que tiene resistencia apreciablemente más alta que la de los buenos conductores e inferior a la de los aislantes, la cual decrece al aumentar la temperatura.

Septicemia: Infección grave y generalizada de todo el organismo debida a la existencia de un foco infeccioso en el interior del cuerpo del cual pasan gérmenes patógenos a la sangre.



12. Bibliografía

- Agbagwa, O. E., & Onyemaechi, S. A. (2014). Microbiological quality of indoor air of a general hospital and a health center in Rivers State Nigeria. *International journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(12), 424 - 431.
- Alves Ribeiro, M., Matos Cruz, J., Nallin Montagnolli, R., Dino Bidoia, E., & Matos Lopes, P. (2015). Photocatalytic and photoelectrochemical inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(1), 105 - 113.
- Arambarri, G., & Aglietti, E. F. (2000). Materiales aislantes de perlita y silicato de calcio conductividad termica y propiedades. *Jornadas*, 941 - 947.
- Augusto, V., Oliveira, C., De Melo, D., Soares, C., & Paiva, C. (2014). Microbiological characterization of the surface contamination in surgical room areas in a Hospital in Sao Paulo (Brazil). *Asociación Colombiana de Infectología*, 18(4), 130 - 134.
- Balú, A. M. (2012). Nanopartículas soportadas sobre materiales porosos para la síntesis de productos de alto valor añadido. *tesis*. Córdoba: Universidad de Córdoba.
- Baraza, J., & Esplugas, S. (2000). Oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales, aplicación de técnicas fotoquímicas y no fotoquímicas en compuestos resistentes a la oxidación. En *Tratamiento de Agua* (págs. 82 - 92).
- Bum Kim, S., Tae Hwang, H., & Chang Hong, S. (2002). Photocatalytic degradation of volatile organic compounds at the gas-solid interface of a TiO₂ photocatalyst. *Chemosphere*, 48, 437 - 444.
- Canudas Vidal, C. M. (2013). Evaluación de la citotoxicidad inducida por sistemas nanoparticulados de SiO₂/PECA en sistemas in vivo. México: UNAM.
- Castro, A. (2012). Biología celular y molecular de la patogenicidad bacteriana y su relación con el hospedero. En C. Cruz, *Bacteriología Medooca basada en problemas* (2 ed.). México: el manual moderno.

- Chan-Soo, K., Jung-Woo, S., Sang-Hun, A., Hee-Dong, J., Tae-Oh, K., & z. (2012). Photodegradation of volatile organic compounds using zirconium-doped TiO₂/SiO₂ visible light photocatalysts. *Chemical Engineering Journal*, 204 - 206, 40 - 47.
- Cheang Wong, J. C. (2005). Ley de Moore, nanotecnología y nanociencias: síntesis y modificación de nanopartículas mediante la impantación de iones. *Revista Digital Universitaria*, 6(7), 1 - 7.
- COFEPRIS. (6 de 3 de 2015). *Calidad del aire*. (S. d. Salud, Editor) Recuperado el 17 de 11 de 2015, de Comisión Federal para la protección contra Riesgos Sanitarios: <http://www.cofepris.gob.mx/MJ/Paginas/NormasPorTema/Calidad-de-aire.aspx>
- Correa Zapata, J. C. (2014). Obtención, caracterización y actividad fotocatalítica del óxido de titanio dopado con nitrógeno a partir de urea y nitrato de amonio para su utilización en la región del visible del espectro electromagnético. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira.
- Crook, B., & Burton, N. (2010). Indoor moulds, Sick Building Syndrome and building related illness. *Fungal Biology Reviews*, 24, 106 - 113.
- De La Rosa, Mosso, & Ullán. (2002). El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. *Observatorio Medioambiental*, 5, 375 - 402.
- Díaz del Castillo Rodríguez, F. (2012). *Introducción a los nanomateriales*. México: UNAM.
- Domínguez, J. M., López, J., Domínguez, J., Martínez, M. L., Moreno, A. B., & Ortega, G. (2012). Efecto bactericida del cobre medido por la supervivencia de *Escherichia coli* y ABRIM en superficies de acero inoxidable y aleación de cobre. *Medicina preventiva*, 18(3), 5 - 8.
- Eames, I., Tang, J. W., Li, Y., & Wilson, P. (2009). Airborne transmission of disease in hospitals. *Interface Focus*, 6, 697 - 702.
- Encarnación Ambríz, C. E. (2014). Tratamiento de Efluentes Hospitalarios Mediante Fotocatálisis Heterogénea y luz visible. *tesis de maestría*. México: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

- Environmental Protection Agency, U. (2011). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. *Desinfection whit ozone*. Recuperado el 5 de noviembre de 2015
- Frimmel , F., & Niessner, R. (2010). Nanoparticles in the Water Cycle . 63 - 65.
- G. Mahy, J., D. Lambert, S., M. Léonard, G. G., Zubiaur, A., Yves Olu, P., Mahmoud, A., . . . Heinrichs, B. (2016). Towards a large scae aqueous sol-gel synthesis of doped TiO₂: Study of various metallic dopings for the photocatalytic degradation of p-nitrophenol. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 329, 189 - 202.
- Garcés Giraldo, L. F., Mejia Franco, E. A., & Santamaría Arango, J. J. (2003). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de investigación*, 1(1), 83 - 92.
- García hernández, M. (2009). Sistemas luminiscentes de polvos y películas nanoestructurados de BaTiO₃:Ln (Ln=Eu³⁺, Er³⁺, Yb³⁺) preparados por métodos química suave. *tesis*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Godish, T. (2001). *Indoor Environmental Quality*. Estados Unidos de America: Lewis Publishers.
- González, M. C. (2015). Calidad de aire interior. Contaminantes biológicos (II). Tipos de muestreo. *Intituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*.
- Goswami, D. Y., Trivedi, D., & Block, S. S. (1995). Proceedings of the ASME International Solar Energy Conference. *Conference*, 421.
- Granados, P. R., & Villaverde, P. M. (2003). *Microbiología. tomo 1: bacteriología, características y clasificación bacteriana. Virologia. Características y técnicas bioquímicas* (Vol. 1). España: Thomson.
- Guardino Solá, X. (1998). Calidad del aire interior. En *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (págs. 44.1 - 44.28). España: Reverte.
- Guillard, C., Bui, T.-H., Felix, C., Moules, V., Lina, B., & Lejeune, P. (2008). Microbiological deinfection of water and air by photocatalysis. *Chimie*(11), 107 - 113.

- Haeng Joe, Y., Woo, K., & Hwang, J. (2014). Fabrication of an anti-viral air filter with SiO₂-Ag nanoparticles and performance evaluation in a continuous airflow condition. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 356 - 363.
- Hinojosa, R. M., Arriaga, S., Diaz, T. L., & Rodríguez, G. V. (2013). Gas-Phase Photocatalytic decomposition of ethylbenzene over perlite granules coated with indium doped TiO₂. *Chemical Engineering Journal*, 224, 106-113.
- Hofmann, H. (2011). Nanomaterials. *Atoms Cluster and Nanomaterials*.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2015). Calidad del aire interior. Contaminantes biológicos (II). Tipos de muestreo. *Notas Técnicas de Prevención*.
- Jaakkola, J., & Miettinen, P. (1995). Ventilation rate in office buildings and sick building syndrome. *Occupational and Environmental Medicine*, 52, 709 - 714.
- Jaramillo Juárez, F., Rincon, A., & Rico Martínez, R. (2009). Contaminación del aire. En F. Jaramillo Juárez, & U. A. Aguascalientes (Ed.), *Toxicología Ambiental* (págs. 39 - 59). Aguascalientes: Textos Universitarios.
- Jaramillo Páez, C. A., & Taborda Ocampo, G. (2006). La fotocatalisis: aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes. *Universidad de Caldas*, 71 - 88.
- Karunakaran, C., Abiramasundari, G., Gomathisankar, P., Manikandan, G., Anandi, V., & m. (2010). Cu-doped TiO₂ nanoparticles for photocatalytic disinfection of bacteria under visible light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 352, 68 - 74.
- Kondo, M. M., Orlanda, J. F., Ferreira, M. A., & Grassi, M. T. (2003). PROPOSIÇÃO DE UM REATOR FOTOCATALÍTICO PARA DESTRUIÇÃO DE MICRORGANISMOS EM. *Quim Nova*, 133 - 135.
- Levenspiel, O. (1991). *Ingeniería de las reacciones químicas*. España: Reverté.

- Li, C., & Hou, P. (2005). Bioaerosol characteristics in hospital clean rooms. *Science Total Environm*, 1 - 3(16976), 305 - 467.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Dunlap, P. V., & Clark, D. P. (2009). *Brock, Biología de los microorganismos* (Vol. 12). Madrid: Pearson Addison Wesley.
- Mairer, M., Pepper, I., & Gerba , C. (2000). Desinfection. *Environmental Microbiology*, 543 - 555.
- Maldonado Vega, M., Peña Cabriaes , J. J., De los Santos Villalobos, S., Castellanos Arevalo, A. P., Camarena Pozos, D., Guzman de Peña, D. L., . . . Valdés Santiago, L. (2014). Bioaerosoles y evaluación de la calidad del aire en dos centros hospitalarios ubicados en León, Guanajuato, México. *Int. Contaminación Ambiental*, 30(4), 351 - 363.
- Martínez Vargas, D. X., Rivera de la Rosa, J., Lucio Ortiz, C. J., Hernández , R. A., Flores Escamilla, G. A., & Garcia, C. D. (2015). Photocatalytic degradation of trichloroethylene in a continuous annular reactor using Cu-doped TiO₂ catalysts by sol-gel synthesis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 179, 249 - 261.
- Mazo Zuluaga, J. (2011). *Una mirada al estudio y las aplicaciones tecnologicas y biomedicas de la magnetita*. Antioquia: Escuela de ingenieria de Antioquia.
- McEvoy, J. G., & Zhang, Z. (2014). Antimicrobial and photocatalytic disinfection mechamnisms in silver-modified photocatalysts under dark and light conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 19, 62 - 75.
- Ming , J., Xintong, Z., Hongting, P., Shunsuke , N., Taketoxhi , M., & Akira , F. (2011). Photochromism-based detection of volatile organic compounds by W-doped TiO₂ nanofibres. *Journal of Colloid and Interface Scinece*, 188 193.
- Moctezuma Zárate, M. d. (2015). Aislamiento de hongos alergenicos en una biblioteca universitaria. *Acta Universitaria*, 25, 32 - 38.
- Morrow, J., Bawa, R., & Wei, C. (2007). Avances recientes en nanomedicina básica y clinica. *Clinicas nédicas de norteamérica*, 805 - 843.

- Muñoz Camacho, E., & Grau Rios, M. (2013). *Ingeniería Química*. Madrid: UNED.
- Muñoz, C. (2011). Diseño y construcción de un prototipo de filtro de aire con acción microbicida. *Tesis*. Aguascalientes: UAA.
- Murray, P. R., Rosenthal, K. S., & Pfaller, M. A. (2008). *Microbiología Médica*. España: Elsevier.
- Nakano, R., Hara, M., Ishiguro, H., Yao, Y., Nakata, K., Murakami, T., . . . Kubota, Y. (2013). Broad Spectrum Microbicidal Activity of Photocatalysis by TiO₂. *catalysts*, 3, 310 - 323.
- Norhidayah, A., Chia-Kuang, L., Azhar, M. K., & Nurulwahida, S. (2013). Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome in Three Selected Buildings. *Procedia Engineering*, 53, 93 - 98.
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Chil Enf Respir*, 26, 16 - 25.
- Paredes, R. G., Robles, J. S., Alamilla, R. G., Galvan, C. R., Romero, I. H., & Gaona, M. A. (2009). Degradación fotocatalítica de BTX presentes en aire con TiO₂/fibra de vidrio en un reactor continuo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(2), 123 - 130.
- Parker, A. (2001). *Contaminación de aire por la industria* (Vol. 1). España: REVERTE.
- Paschoalino, M. P., & Jardim, W. F. (2008). Indoor air disinfection using a polyester supported TiO₂ photo-reactor. *Journal compilation*, 473-479.
- Pedroza Vera, J. V. (2014). Materiales nano-estructurados de TiO₂-Cu²⁺ síntesis, caracterización y aplicaciones. *TESIS*. Aguascalientes: UAA.
- Pelgrift, R. Y., & Friedman, A. J. (2013). Nanotechnology as a therapeutic tool to combat microbial resistance. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65, 1803 - 1815.
- Pereira, A. V., & Caicedo, Y. C. (2014). Aerobacterias en las unidades de cuidado intensivo del hospital Universitario "Fernando Troconis", Colombia. *Rev Cubana Salud Pública*, 40(3), 362 - 368.

- Pigeot-Remy, S., Real, P., Simonet, F., Hernandez, C., Vallet, C., Lazzaroni, J. C., . . . Guillard, C. (2013). Inactivation of *Aspergillus niger* spores from indoor air by photocatalytic filters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 167 - 173.
- Portela Rodriguez, R. (2008). Eliminación fotocatalítica de H₂S en aire mediante TiO₂ soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A. Santiago: Universidad de Santiago de Compostela.
- Prado, V., Vidal, R., & Durán, C. (2012). Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. *Rev. Med. Chile*, 140, 1325 - 1332.
- Prieto Mahaney, O. O. (25 de mayo de 2015). *ESTUDIO SOBRE LAS DEPENDENCIAS INTRINSECAS DE LAS ACTIVIDADES FOTOCATALITICAS SOBRE LAS PROPIEDADES ÓXIDO DE TITANIO (IV)*. Obtenido de resúmenes de los trabajos académicos de nuestros becados: http://www.bo.emb-japan.go.jp/itpr_es/Becas-Prieto.html
- Puerta García, A., & Mateos Rodríguez, F. (2010). *Enterobacterias*. España: Medicine.
- Ramírez Palma, M. T., Huirache Acuña, R., Espinosa Acosta, G., & Hernández Padrón, G. (2009). Estado del arte del proceso sol-gel en México. *Divulgador*, 17(2), 183 - 188.
- Romero, R. C. (2007). *Microbiología y parasitología humana: bases etiológicas de las enfermedades infecciosas y parasitarias*. México: Panamericana.
- Rosell Farrás, G., & Muñoz Martínez, A. (2010). Ventilación general en hospitales. *Notas técnicas de Prevención*, 859.
- Sandoval Flores. (2014). Aspectos físicos, químicos y biológicos de la contaminación hospitalaria. *Medicina e investigación*, 35 - 41.
- Saucedo Teran, R. A., Nevárez Moorillon, G. V., Bautista Marguilis, R. G., & Manzanaes Papayanopolus, L. I. (2008). Materiales de soporte para el crecimiento de película en un reactor de lecho fluidizado. *Medio ambiente y desarrollo sustentable*, 118 - 130.

- SECRETARIA MEDIO AMBIENTE, D. E. (2010). *Gobierno del estado de Aguascalientes*. Recuperado el 27 de enero de 2016, de Monitoreo de la calidad del aire: <http://www.aguascalientes.gob.mx/IMAE/Calidadelaire/monitoreo.aspx>
- SEMARNAT. (2012). *Secretaría de medio ambiente y recursos naturales*. Recuperado el 25 de 5 de 2015, de instituto nacional de ecologia y cambio climatico: <http://www.inecc.gob.mx/>
- Shao, G. N., Imran, S. M., Jeong Jeon, S., Jae Kang, S., Haider, S. M., & Taik Kim, H. (2015). Sol-gel synthesis of vanadium doped titania: Effect of the synthetic routes and investigation of their photocatalytic properties in the presence of natural sunlight. *Applied Surface Science*, 351, 1213 - 1223.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2014). Microscopía electrónica de barrido. En *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (págs. 121 - 122). México: McGraw Hill.
- Suligoj, A., Lavrencic Stangar, U., Ristic, A., Manzaj, M., Verhovsek, D., & Novak Tusar, N. (2016). TiO₂-SiO₂ films from organic-free colloidal TiO₂ anatase nanoparticles as photocatalyst for removal of volatile organic compounds from indoor air. *Applied Catalysis B: Environmental*, 184, 119 - 131.
- Takeuchi, N. (2009). Las nanoestructuras, la nanociencia y la nanotecnología. In N. Takeuchi, *Nanociencia y nanotecnología*. México.
- Terradas, J. (15 de 11 de 2007). *contaminación atmosférica*. Recuperado el 15 de 5 de 2015, de <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf>
- Thanh Dong, P., & Byeong Kyu, L. (2014). Feasibility of Silver Doped TiO₂/Glass Fiber Photocatalyst under Visible Irradiation as an Indoor Air Germicide. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 3271 - 3288.
- Thörn, Á. (1998). The sick building syndrome: a diagnostic dilemma. *Social, Science y Medicine*, 47(9), 1307 - 1312.

- Torres, L. M., & Ruiz, M. G. (2011). Estudio de las propiedades estructurales, texturales y catalíticas de TiO₂ dopado con indio y níquel. *ingenierias*, 23 - 53.
- Tortura, J., Funke, R., & Case, L. (2007). *Introducción a la microbiología*. España: Panamericana.
- Travizano, M., Romano, S., & Kamienkowski, J. (2002). *Determinación de la banda prohibida (BAND GAP) en Si*. Recuperado el 11 de mayo de 2015, de http://users.df.uba.ar/sgil/labo5_uba/inform/info/pautadas/band_gap_siI_2k2a.pdf
- Valencia Barrón, J. P. (2013). Síntesis y caracterización de cristales de oxiclورو de bismuto por métodos hidrotermal y solvotermal en presencia de diferentes estabilizantes. *TESIS, 1*. México: Universidad Iberoamericana.
- Wang, B.-L., Takigawa, T., Yamasaki, Y., Sakano, N., Wang, D.-H., & Ogino, K. (2008). Symptom definitions for SBS (sick building syndrome) in residential dwellings. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211, 114 - 120.
- Wang, S., Ang, H., & Tade, M. (2007). Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art. *Environment International*, 33, 694 - 705.
- Yadav, H. M., Otari, S. V., Koli, V. B., Mali, S. S., Hong, C. K., Pawar, S. H., & Delekar, S. D. (2014). Preparation and characterization of copper-doped anatase TiO₂ nanoparticles with visible light photocatalytic antibacterial activity. *Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry*, 280, 32 - 38.